

Eemeli Åman

AVOLAVAKUIVURIN SÄHKÖNKULUTUKSEN OPTIMOINTI HAKKEEN KUIVAUKSESSA

AVOLAVAKUIVURIN SÄHKÖNKULUTUKSEN OPTIMOINTI HAKKEEN KUIVAUKSESSA

Eemeli Åman
Opinnäytetyö
Syksy 2017
Energiatekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Eemeli Åman

Opinnäytetyön nimi: Avolavakuivurin sähkönkulutuksen optimointi hakkeen kuivauksessa

Työn ohjaajat: Jukka Ylikunnari ja Anu Hilli

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2017

Sivumäärä: 44 + 12

Puulla on tärkeä merkitys koko Suomen energiatuotannossa, sillä noin viidesosa kaikesta energiasta tuotetaan puulla tai puupohjaisilla energianlähteillä. Suurimmat uusiutuvan energian kasvutavoitteet kohdistuvatkin puupohjaisiin polttoaineisiin ja lähinnä metsähakkeen käyttöön. Metsähakkeella tarkoitetaan haketta, joka on valmistettu rangoista, kokopuusta tai hakkuutähteistä.

Tämä opinnäytetyö laadittiin osana Puuta-hanketta. Utajärven kunnan Puuta-hanke selvittää puuraaka-aineen tehokkaampaa hyödyntämistä puutuotteina tai raaka-aineena. Tässä opinnäytetyössä selvitettiin, millä tavalla haketta saataisiin avolavakuivurilla kuivattua energiatehokkaammin ja kuinka hakkeeseen puhallettava kuivausilmamäärä vaikuttaa hakkeen kuivumiseen.

Työ toteutettiin suorittamalla hakkeen kuivauskokeita avolavakuivurilla syyskuussa, marraskuussa sekä tammikuussa kaadetuille koivuhakkeille. Työn teoriaosuudessa käsitellään yleisesti bioenergiaa ja bioenergian käyttöä Suomessa sekä maailmalla. Lähteinä työssä käytetään puupolttoaineen kuivuriopasta sekä useita verkkosivuja.

Hakkeeseen puhallettavan kuivausilmamäärän lisääminen vaikutti selvästi hakkeen kuivumiseen ja kuivauksen energiatehokkuuteen. Kun ilmamäärää kasvatettiin, hake-erät kuivuivat nopeammin ja tasaisemmin. Lisäksi hake-erien kuivuminen haluttuun kosteuspitoisuuteen oli paremmin ennustettavissa.

Kuivausilmamäärän vaikutusta hakkeen kuivumiseen kannattaisi selvittää lisää ja mahdollisesti kannattaisi tutkia myös hakkeen kuivauksen aikana muuttuvan ilmamäärän mahdollisia hyötyjä kuivaustulokseen.

Asiasanat: polttohake, kuivatus, biomassa, bioenergia

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Energy Technology

Author: Eemeli Åman

Title of thesis: Optimization of open platform woodchip dryer's electricity consumption

Supervisors: Jukka Ylikunnari ja Anu Hilli

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2017 Number of pages: 44 + 12

Wood plays an important role in Finland's energy production, as about one fifth of all energy is produced with wood or wood-based energy sources. The biggest renewable energy growth targets are focused on wood-based fuels and mainly for the use of woodchips.

This thesis is made in co-operation with municipality of Utajärvi and it is a part of the Puuta project. Puuta project studies potential improvements in the use of wood based materials in municipality of Utajärvi. Thesis studies optimization of open platform woodchip dryer's electricity consumption. The main goal of the thesis is to find out how the drying of the woodchips could be more energy efficient and how the mass flow of drying air affects the drying process.

This thesis was accomplished by doing drying measurements to birch woodchips, which were logged and chipped during September, November and January. In the theoretical part of this thesis are covered basics of bioenergy in Finland and whole world. Sources of information used in this thesis are puupolttoaineen kuivuriopas and multiple online sources.

The result of this thesis was the optimal airflow value to use on this open platform woodchip dryer. From the results of thesis, it is discovered that increased volume of airflow has positive effect on energy efficiency of woodchip drying process. In my opinion the effect of increased volume of airflow should be studied further and possibly study the possible benefits of alternating airflow.

Keywords: woodchip, woodchip drying, biomass, bioenergy

SISÄLLYS

	TIIVISTELMÄ	3
	ABSTRACT	4
	SISÄLLYS	5
1	JOHDANTO	7
2	BIOENERGIA	8
	2.1 Bioenergia maailmalla	9
	2.2 Puun ja puupohjaisen energian osuus Suomen energiantuotannosta	10
3	HAKE	12
	3.1 Hakkeen kuivaus	12
	3.2 Kuivurityypit	13
	3.2.1 Kylmäilmakuivaus	14
	3.2.2 Lämminilmakuivaus	14
	3.2.3 Työssä käytetty kuivuri	15
4	MITTAUKSET	17
	4.1 Kosteusmittaukset	18
	4.1.1 Pikakosteusmittaus	18
	4.1.2 Uunikosteusmittaus	18
	4.2 Irtotiheyden määrittäminen	19
	4.3 Optimointimittaukset	20
	4.3.1 Optimointimittauslaskut	21
	4.3.2 Eri ilmamäärillä lasketut vedensitomiskyvyt	25
5	KUIVAUSTULOKSET	28
	5.1 Syyskuussa kaadetun hakkeen kuivaukset	28
	5.1.1 Kuivaukset 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella	28
	5.1.2 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella	30
	5.1.3 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna	31
	5.1.4 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n taajuudella teipattuna	32
	5.2 Marraskuussa kaadetun hakkeen kuivaukset	33
	5.2.1 Kuivaukset 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna	33
	5.2.2 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna	34
	5.2.3 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 40 Hz:n taajuudella teipattuna	36

5.3	Tammikuussa kaadetun hakkeen kuivaukset	37
5.3.1	Kuivaukset 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna.....	37
5.3.2	Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna.....	38
5.3.3	Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n taajuudella teipattuna.....	40
6	YHTEENVETO	42
	LÄHTEET	43
	LIITTEET	44

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on avolavakuivurin sähkönkulutuksen optimointi hakkeen kuivauksessa. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä Utajärven kunnan kanssa osana Puuta-hanketta, joka selvittää puuraaka-aineen tehokkaampaa hyödyntämistä puutuotteena tai energiana.

Bioenergian jatkuvan kasvun myötä pyritään kehittämään entistä tehokkaampia menetelmiä hyödyntää biopolttoaineita. Puupolttoaineiden kuivaus on yksi tapa parantaa puupolttoaineen ominaisuuksia. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, millä tavalla haketta tulisi kuivattua energiatehokkaammin ja miten hakkeeseen puhallettava kuivausilmamäärä vaikuttaa hakkeen kuivaukseen.

Opinnäytetyö toteutetaan tekemällä kuivausmittauksia syyskuussa, marraskuussa sekä tammi-kuussa kaadetuille koivuhakkeille. Kuivauksia suoritettiin Sanginsuussa lämmittämättömässä hallissa ja myöhemmin siirryttiin suorittamaan kuivaukset Utajärven Mustikkakankaalle.

Työni teoriaosuudessa käsitellään yleisesti bioenergiaa ja bioenergian käyttöä Suomessa sekä maailmalla. Lisäksi opinnäytetyössä tutustutaan hakkeeseen ja hakkeen kuivaukseen. Opinnäytetyössä myös esitellään erilaisia kuivurivaihtoehtoja Suomessa.

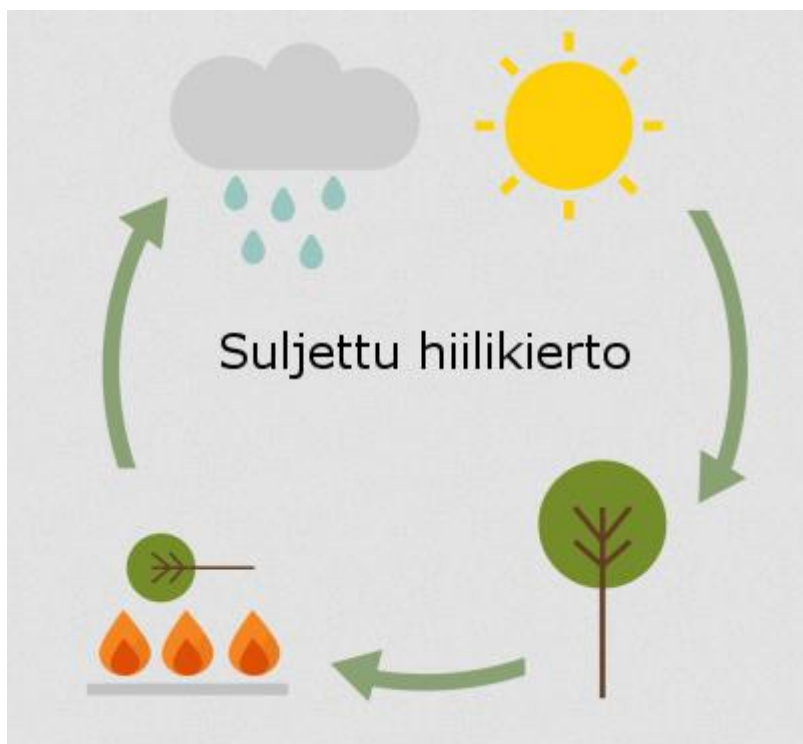
Opinnäytetyössä käydään läpi optimointimittauksien tulokset ja niiden avulla lasketaan kuivausilmamäärän vaikutus hakkeen kuivaukseen. Näiden tulosten pohjalta suoritettiin kuivauksia, joissa kuivausilmamäärän hyöty voitiin todeta käytännössä.

2 BIOENERGIA

Bioenergia on biopolttoaineista saatavaa energiaa, biopolttoaine on biomassasta valmistettua polttoainetta ja biomassa on eliöperäistä raaka-ainetta tai materiaalia. Energiantuotannossa biomassalla viitataan monenlaisiin eloperäisiin jätteisiin esimerkiksi puuhun, hakkuujätteisiin sekä sokeria ja tärkkelystä sisältäviin kasveihin. (Bioenergia ry 2017, viitattu 17.03.2017.)

Biomassan hyötyihin lukeutuu sen helppo ja luotettava saatavuus. Lisäksi biomassa on halvempaa kuin fossiiliset polttoaineet, biomassaa voidaan säilöä ja käyttää tarvittaessa (helppo vastata tuotantotarvepiikkeihin). Lisäksi biomassa luo työpaikkoja ja biomassalla on suljettu hiilikierto toisin kuin fossiilisilla polttoaineilla sekä monia muita hyötyjä. (European Biomass Association 2015, viitattu 17.03.2017.)

Suljetussa hiilikierrossa (kuvio 1) biomassan poltossa ilmaan vapautuva hiilidioksidi sitoutuu kasvaviin puihin, jolloin hiilikierto sulkeutuu. Puu luovuttaa sitoutuneen hiilidioksidin niin lahotessaan kuin palaessaankin. (Metsäntutkimuslaitos 2010, viitattu 17.3.2017.)

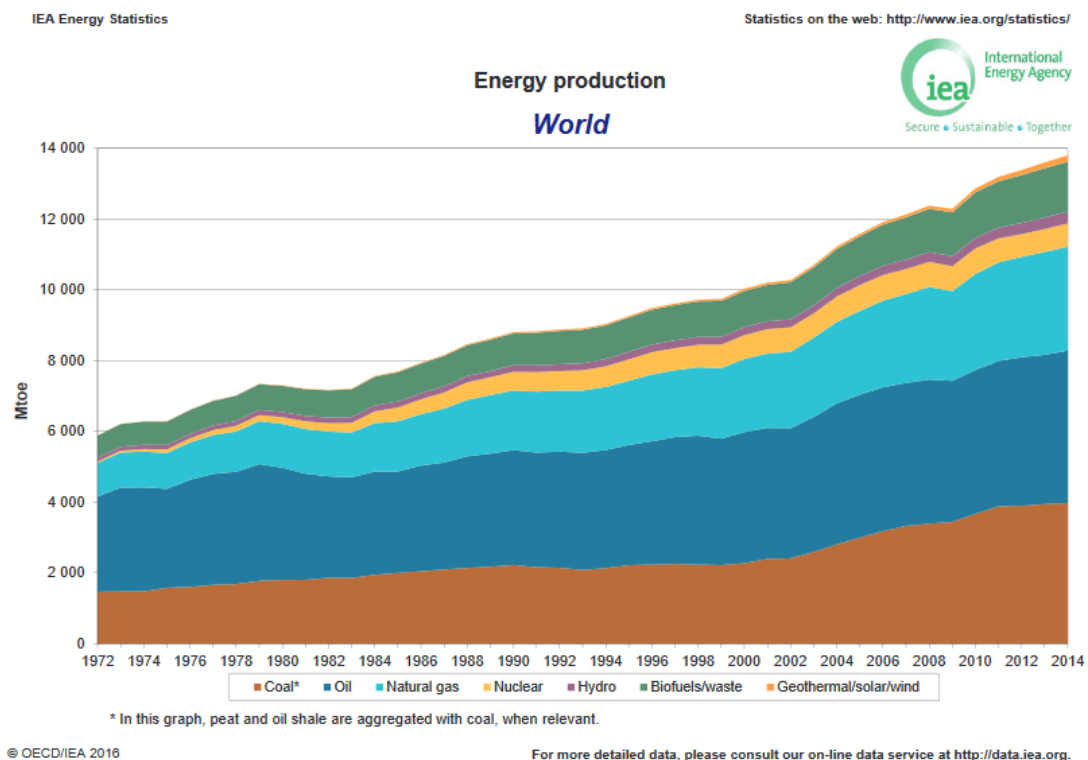


KUVIO 1 Suljettu hiilikierto (Shaw Renewables 2017, viitattu 17.3.2017)

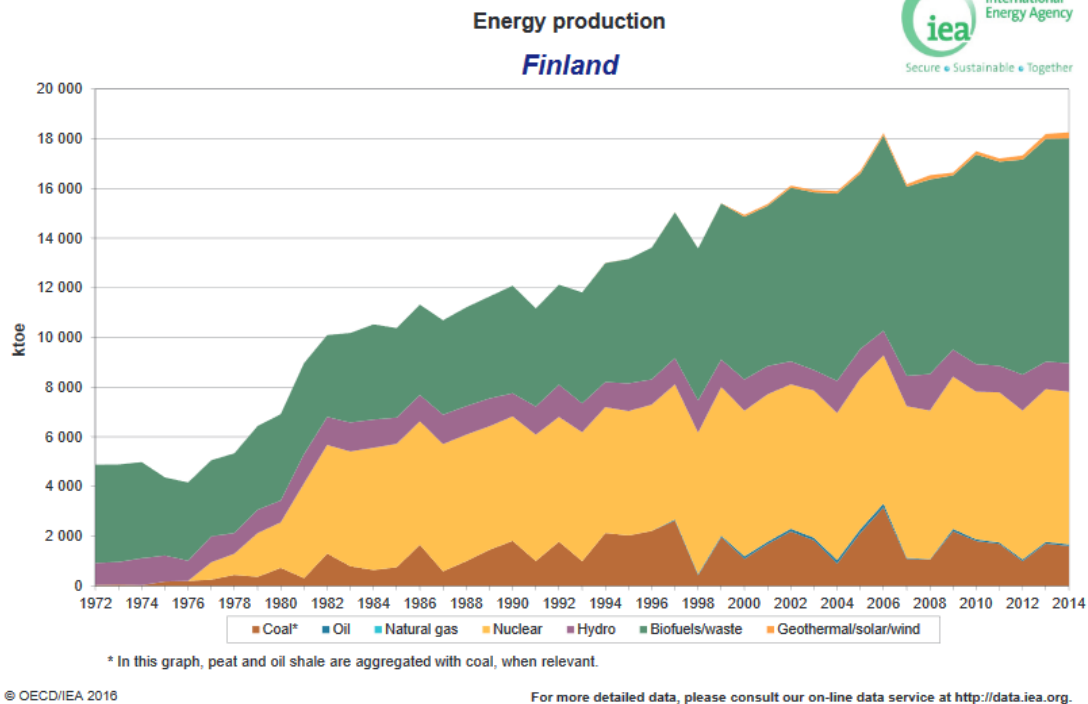
2.1 Bioenergia maailmalla

Bioenergian kokonaiskapasiteetti maailmalla vuonna 2014 oli 90,2 GW, ja samana vuonna biopolttoaineilla katettiin 4 % maailman tiekuljetusten polttoainekuluista (International Energy Agency 2017, viitattu 17.03.2017).

Suomen merkittävin uusiutuvan energian lähde on bioenergia. Suomen energiantuotannossa bioenergian osuus on korkeampi kuin maailman energiantuotannossa. Vuonna 2010 maailman energiankulutuksesta 16 % katettiin bioenergialla. Suomessa bioenergia muodostaa 80 % uusiutuvasta energiasta ja kattaa noin neljänneksen koko maan energiankulutuksesta. Seuraavissa kuvaajissa (kuviot 2 ja 3) näkyy bioenergian osuus menneinä vuosina koko maailman energiantuotannosta sekä Suomen energiantuotannosta. Kuvaajista havaitaan esimerkiksi ydinvoiman voimakas kasvu Suomessa 1980-luvun alussa sekä bioenergian/biojätteen hidas mutta tasainen kasvu. (REN21 2011, 7; Bioenergia ry 2017, viitattu 17.03.2017.)



KUVIO 2 Energiantuotannon kasvu maailmalla vuosina 1972–2014 (International Energy Agency 2017, viitattu 17.03.2017)



KUVIO 3 Energiantuotannon kasvu Suomessa vuosina 1972–2014 (International Energy Agency 2017, viitattu 17.03.2017)

2.2 Puun ja puupohjaisen energian osuus Suomen energiantuotannosta

Biomassan osuus Suomessa energian kokonaiskulutuksesta on teollisuusmaiden korkein, ja erityisesti puusta saatavan biomassan osuus on merkittävän suuri. Puupohjaisten polttoaineiden sekä metsäteollisuuden jäteliemien osuus koko bioenergian tuotannosta oli 2008 vuonna noin 95 %. Kierrätyspolttoaineiden, peltobiomassojen, biokaasun sekä biopohjaisten polttonesteiden osuus kattoi loput eli 4,9 %. Uusiutuvan energian kokonaistuotannosta puun ja puupohjaisen energian osuus vuonna 2008 oli noin 76 %. Tästä teollisuuden käyttämien jäteliemien osuus oli 36 %, teollisuuden polttoaineiden osuus 26 % ja loput 14 % koostui puun pienkäytöstä. (Bio-Expert Oy 2012, viitattu 18.03.2017.)

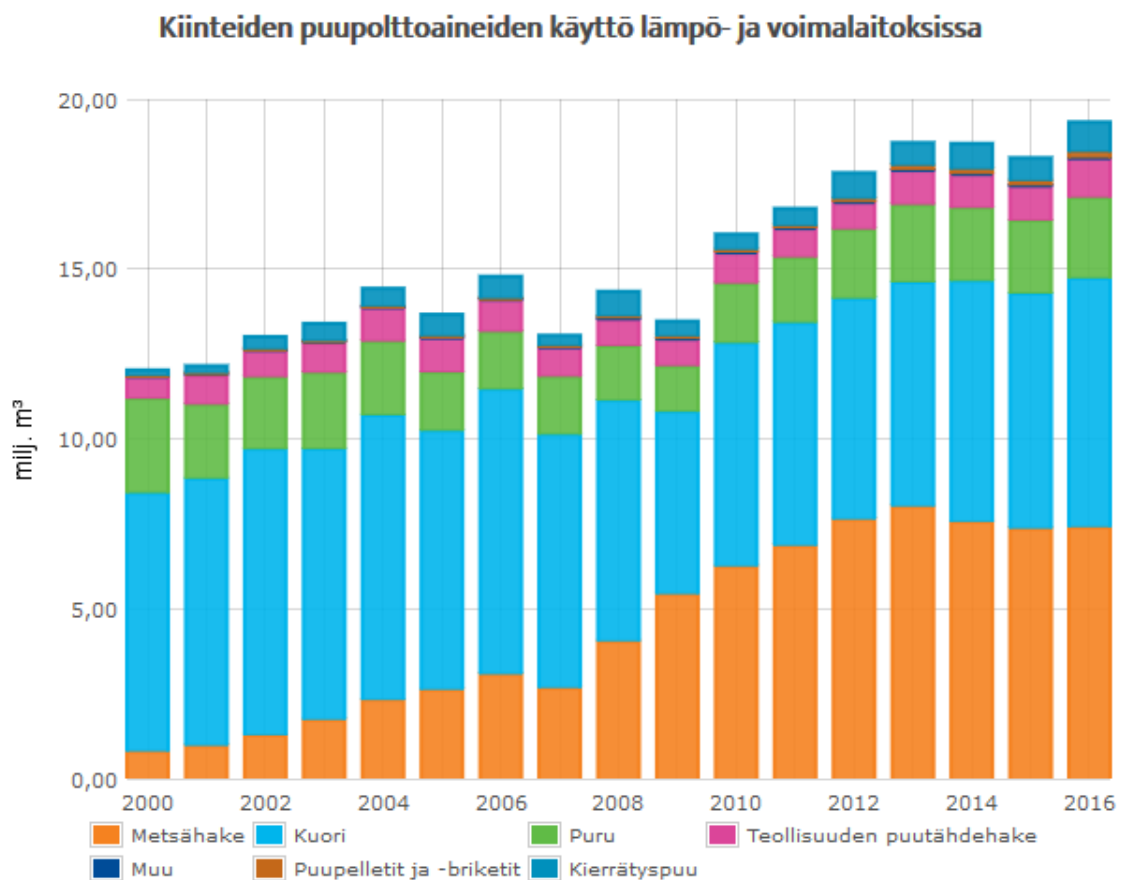
Puulla on tärkeä merkitys koko Suomen energiantuotannossa, sillä noin viidesosa kaikesta Suomessa käytettävästä energiasta tuotetaan puulla ja puupohjaisilla energialähteillä. Puuenergian suurin käyttäjä on metsäteollisuus, joka hyödyntää metsähaketta ja prosesseissaan syntyviä puupohjaisia sivutuotteita ja jäteliemiä, kuten mustalipeää, energiantuotannossaan. Metsäteollisuus-

nessa syntyvistä sivutuotteista voidaan hakkuutähteen ohella valmistaa liikennepolttoaineiksi sopivia biopolttoaineita metsäteollisuuden biojalostamokonseptilla, jota parhaillaan kehitetään. (Bio-Expert Oy 2012, viitattu 18.03.2017.)

Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa tavoitellaan erityisesti metsähakkeen, liikenteen biopolttoaineiden ja tuulivoiman käytön merkittävää lisäystä. Eurooppa 2020 kasvustrategian myötä bioenergian merkitys tulee korostumaan entisestään. (Bio-Expert Oy 2012, viitattu 18.03.2017.)

Suomessa uusiutuvan energian suurimmat kasvutavoitteet kohdistuvat metsähakkeen käyttöön. Metsähaketta käytettiin vuonna 2016 noin 7,1 miljoonaa kuutiometriä. Tavoitteena on, että hakkeen käyttömäärä nousee 13,5 miljoonaan kuutiometriin eli melkein kaksinkertaiseksi nykyisestä vuoteen 2020 mennessä. (Bio-Expert Oy 2012, viitattu 18.03.2017.)

Kuviosta 4 nähdään eri kiinteiden puupolttoaineiden osuus kiinteiden puupolttoaineiden käytöstä. Kaaviosta havaitaan, että metsähakkeen käyttö on kasvanut hurjaa vauhtia vuodesta 2000 lähtien.



KUVIO 4 Kiinteiden puupolttoaineiden osuudet kiinteiden puupolttoaineiden käytöstä lämpö- ja voimalaitoksissa (Luonnonvarakeskus 2017, viitattu 20.3.2017)

3 HAKE

Metsähaketta on polttohake tai -murske, jonka valmistamiseen voidaan käyttää metsästä saatavaa puuta, esimerkiksi runkopuuta, latvuksia, oksia, neulasia, lehtiä, kantoja ja juurakoita. Haketta käytetään yleensä rakennusten lämmityskattiloissa, lämpölaitoksilla ja teollisuuden lämpö- ja voimalaitoksilla. (Alakangas 2000, 48; Metsäntutkimuslaitos 2014, viitattu 18.03.2017.)

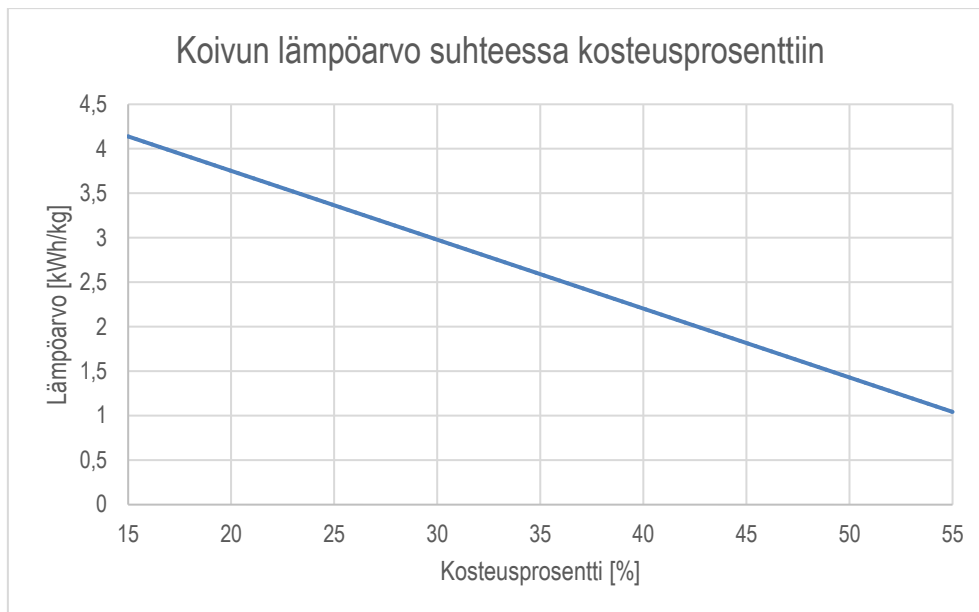
Hyvälaatuisen hakkeen kriteerit ovat hakkeen kosteus, laadun tasaisuus sekä palakoko. Sopivan hakkeen palakoko on 5-50 mm. Haketetusta runkopuusta saadaan laadukkaampaa haketta. (Bioenergianeuvoja.fi 2017, viitattu 19.03.2017.)

3.1 Hakkeen kuivaus

Hakkeen kosteuteen voidaan vaikuttaa luonnonkuivauksella tai keinokuivauksella. Haketta kuivaettaessa hakkeen kosteus laskee ja näin hakkeen lämpöarvo kasvaa, kun veden höyrystymiseen ei kulu niin paljon energiaa polttoaineen käyttövaiheessa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuivaa puupolttoainetta tarvitaan huomattavasti vähemmän kuin kosteaa puupolttoainetta.

Hakkeen kuivaamisesta on paljon muutakin hyötyä, esimerkiksi kuiva hake ei mene helposti pilalle, hake on kevyempää (pienemmät logistiikkakulut, vettä ei kannata kuljettaa) ja pienemmät laitokset sekä kotitaloudet vaativat hakkeelta parempia ominaisuuksia. Suurissa lämpölaitoksissa voidaan käyttää jopa tuorekosteaa puuraaka-ainetta, mutta pienten lämpölaitosten sekä kotitalouksien hakkeen kosteuspitoisuuden suositellaan olevan alle 25 % (Hilli, Kylmänen, Härkönen & Uutela. 2016, viitattu 19.03.2017).

Kuviosta 5 nähdään koivun lämpöarvo suhteessa kosteusprosenttiin. Kuvaajasta huomataan, että kuivaus 45 %:n kosteudesta 25 %:n kosteuteen nostaa koivun lämpöarvoa noin puolitoista kWh/kg. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuivaa polttoainetta vaaditaan huomattavasti vähemmän kuin kosteaa polttoainetta.



KUVIO 5 Koivun lämpöarvo suhteessa kosteusprosenttiin

3.2 Kuivurityypit

Karkeasti luokiteltuna kuivureita yritys- ja kuluttajakäyttöön on monenlaisia, esimerkiksi kylmäilma-kuivuri, kylmäilmakuivuri ja ajoittainen lisälämpö, lämminilmakuivuri, kuumailma-kuivuri, kuumakuivuri ja luonnonolosuhteissa tapahtuva kuivaus. Kuumakuivausta, jossa hakkeen kuivaus tapahtuu kuumalla höyryllä, ei juurikaan käytetä. (Kauppinen 2014, 11.)

Keinokuivaus Suomessa voidaan jakaa pääpiirteittäin kahteen kuivausprosessiin, lämminilma-kuivaukseen ja kylmäilmakuivaukseen (Kauppinen 2014, 12).

Energiapuusta ylivoimaisesti suurin osa kuivataan luonnonkuivauksessa, esimerkiksi tienvarsivarastoissa sekä välivarastoissa. Viime vuosina energiapuun toimitus on lisääntynyt ns. energiapuuterminaalien kautta, jolloin osa puun kuivatuksesta ja sen jatkokäsittelystä on mahdollista toteuttaa tehokkaammin terminaalikentällä. Luonnonkuivauksessa kuivatun hakkeen kosteus on tavallisesti 30–50 prosenttia, mutta jos kuivaus on onnistunut erityisen hyvin, voi hakkeen kosteus olla jopa 25 prosenttia. Hakkeen keinokuivauksella voidaan saavuttaa 15 prosentin kosteus. (Kauppinen 2014, 11; Lepistö 2010, 32.)

Keinokuivauksen ja luonnonkuivauksen erona on se, että keinokuivauksessa pyritään lisäenergiaa käyttämällä lyhentämään kuivausaikaa. Käytännössä tämä tarkoittaa aina puhaltimen ja siihen yhdistetyn rakennelman käyttöä. (Kauppinen 2014, 12.)

3.2.1 Kylmäilmakuivaus

Kylmäilmakuivaus tapahtuu ulkoilman lämpötilassa tai auringon säteilyenergiaa hyödyntävien keräimien avulla, joilla voidaan puhallusilman lämpötilaa nostaa muutamia asteita. Kylmäilmakuivauksessa on muistettava, että kuivauksen toimivuus riippuu hyvin paljon vallitsevasta säästä. Ulkoilma joko imetään tai puhalletaan koneellisesti kuivattavan hake- tai pilkekerroksen läpi. Esimerkiksi aurinkoiselta seinustalta pyritään ottamaan kuivausilma, jotta puukasaan menevän ilman suhteellinen kosteus olisi alhainen ja lämpötila mahdollisimman korkea. (Kauppinen 2014, 12.)

Puhaltimia ei kannata käyttää ulkoilman suhteellisen kosteuden ollessa korkea. Ilman puhallusta voidaan säätää ilman suhteellisen kosteuden ja puun kosteuden mukaan. Esimerkiksi käytetystä merikontista voidaan tehdä kylmäilmakuivuri. (Kauppinen 2014, 12.)

3.2.2 Lämminilmakuivaus

Lämminilmakuivauksessa kuivausaika ja kuivausprosessi saadaan hallituiksi. Lämminilmakuivauksessa kuivausilman lämpötila pidetään alle sadassa asteessa, yleensä noin 60–70 asteessa. Lämminilmakuivauksella ympärivuotinen toiminta on mahdollista ja raaka-aineeseen sitoutuneen pääoman kierto on nopeampi. Kuivausilman lämmityksen energiamäärä voidaan lähes puolittaa lämmön talteenotolla. (Kauppinen 2014, 12.)

3.2.3 Työssä käytetty kuivuri

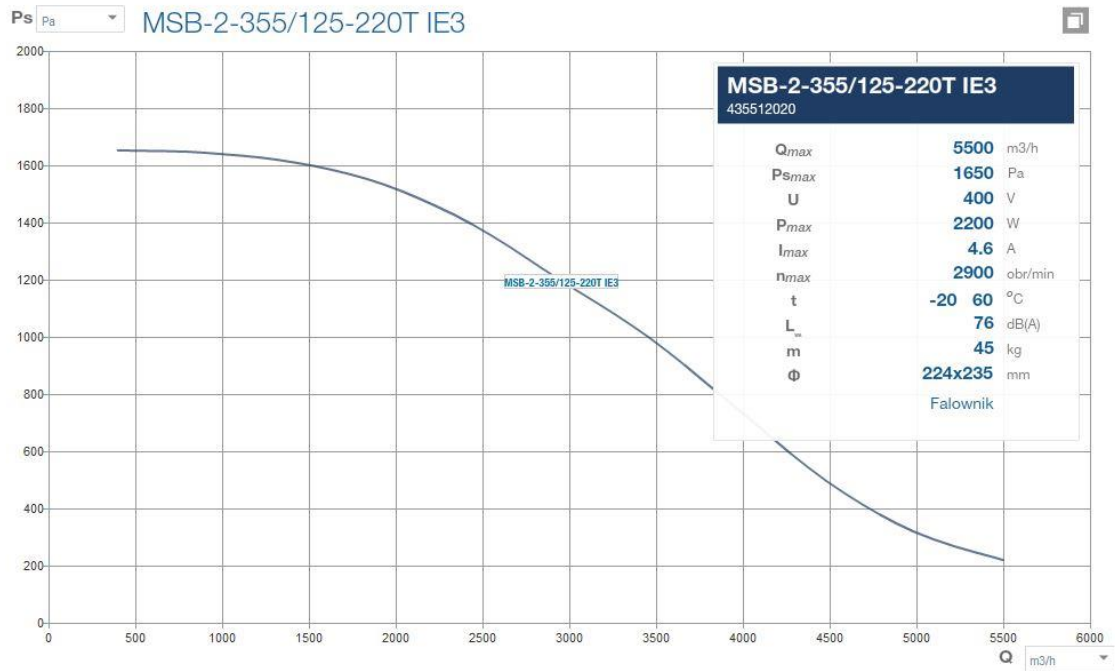
Työssä käytettiin Matti Norrkniivilän opinnäytetyössään suunnittelemaa siirrettävää avolavakuivuria (kuvio 6). Kuivurin tuli olla irrallinen kokonaisuus, ja kuivuria oli tarkoitus kuljettaa peräkärryllä. Kuivurin pohjan pinta-ala on noin 2 m². Kuivauksissa kuivattiin 0,5 i-m³ haketta kerrallaan, ja näin ollen hakekerroksen paksuus oli vain noin 0,25 metriä.



KUVIO 6 Avolavakuivurin sähkökeskus, hallilämmitin sekä keskipakoispuhallin

Kuivurissa ilmaa puhalletaan suomupohjalevyn läpi Ventur finland Oy Ab:n MSB-2-355/125-220T -pölyisen ilman keskipakoispuhaltimella. Kuivausilmaa lämmitetään ITM09-sähkölämmittimellä ja keskipakopuhaltimen nopeutta säädetään ABB:n 3-vaiheisella ACS550-taajuusmuuntimella. (Kuvio 7.)

Tuottokäyrät



KUVIO 7 Keskipakoispuhaltimen suorituskäyrä (Ventur 2014, viitattu 18.3.2017)

4 MITTAUKSET

Hakkeen kuivauksessa ohjeistettu kuivausilmamäärä on noin 400–500 m³/h kuivattavaa irtokuutiometriä kohden. Näillä ohjearvoilla työssä käytettävän kuivurin kuivausilmamäärän pitäisi olla noin 200–250 m³/h, joka tässä tapauksessa on liki mahdoton toteuttaa keskipakoispuhaltimen mitoituksista johtuen. Kuivattavaa hakemäärääkin oli vaikeaa kasvattaa pidentyvän kuivausajan takia.

Haketta kuivattiin joka kerralla noin 500 litraa ja hakkeen loppukosteudeksi tavoiteltiin 25 % ja joissain kuivauksissa 20 %. Lämmittimen säädöt pidettiin joka kuivauskerralla samana, mutta keskipakoispuhaltimen säätöjä muutettiin kuivauskokeissa.

Kuivattavasta hakkeesta otettiin kosteusnäytteet Wile BIO Moisture -hakemittarilla puolen tunnin välein (kuvio 8), ja myös ilman lämpötila sekä suhteellinen kosteus kirjattiin ylös. Ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta seurattiin Kimo Kistock KH-210 -dataloggerilla. Uunikuivausnäytteet sekä irtotiheysnäytteet punnittiin Radwag PS6000/C/1 -digitaalisella vaa'alla. Kuivaimen energiankulutusta seurattiin Rish Master 3430 -monitoimisella sähkömittarilla.



KUVIO 8 Wile BIO Moisture -hakemittari (Farmcomp Oy 2008, viitattu 18.3.2017)

4.1 Kosteusmittaukset

Työssä toteutettiin kosteusmittauksia kahdella eri tavalla, pikakosteusmittauksella ja uunikosteusmittauksella.

4.1.1 Pikakosteusmittaus

Pikakosteusmittarilla mitattiin hakkeen kosteus kuudesta eri kohdasta aina puolen tunnin kuivauksen välein ja arvoista laskettiin keskiarvo. Pikakosteusmittarilla mitattiin hakkeen alkukosteus kuivuria täytettäessä myös kuuden näytteen keskiarvona.

Pikakosteusmittarin tulos verrattuna uunikuivausmenetelmään vaihteli. Vaihtelua esiintyi molempiin suuntiin 1–5 prosenttiyksikön verran. Toisin sanoen pikakosteusmittarilla saatu tulos hakkeen kosteudesta oli kosteampi tai kuivempi verrattuna uunikuivausmenetelmän antamaan tulokseen. Tästä syystä pikakosteusmittarin antamia tuloksia käytettiin hakkeen kuivumisen seurantaan ja alku- ja loppukosteus määritettiin uunikuivausmenetelmällä.

4.1.2 Uunikosteusmittaus

Hakkeesta otettiin uunikosteusnäytteet ennen kuivausta ja kuivauksen jälkeen. Alkukosteusnäyte otettiin kuivuria täytettäessä samalla kun pikakosteusmittarilla mitattiin alkukosteus.

Ennen kuin uuninäytteet jaettiin metallivuokiin, vuoat punnittiin ja vuokien painot kirjattiin ylös. Tämän jälkeen kosteusnäytteet laitettiin vuokiin ja vuoka näytteineen punnittiin ja kirjattiin tulokset. Näytteitä oli yhteensä kuusi kappaletta, joista kolme oli alkukosteusnäytteitä ja loput kolme loppukosteusnäytteitä. Näytteet laitettiin lämpökaappiin, jossa näytteet olivat 105 °C:n lämpötilassa 16–20 tuntia. Kuivauksen jälkeen näytteet punnittiin ja näytteiden kosteuspitoisuudet laskettiin kaavan 1 avulla. Alku- ja loppukosteusnäytteistä (kuvio 9) laskettiin kosteuspitoisuuksien keskiarvot, jotka kirjattiin lopputuloksiin.

KAAVA 1. Hakenäytteen kosteuspitoisuuden laskukaava.

$$M_{ar} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_{v1}} * 100$$

missä

M_{ar} = märkápainoa kohti laskettu kosteus (%)

m_1 = kostean näytteen massa (g)

m_2 = kuivan näytteen massa (g)

m_{v1} = metallivuoan massa (g)



KUVIO 9 Hakkeen kosteusnäytteen punnitus

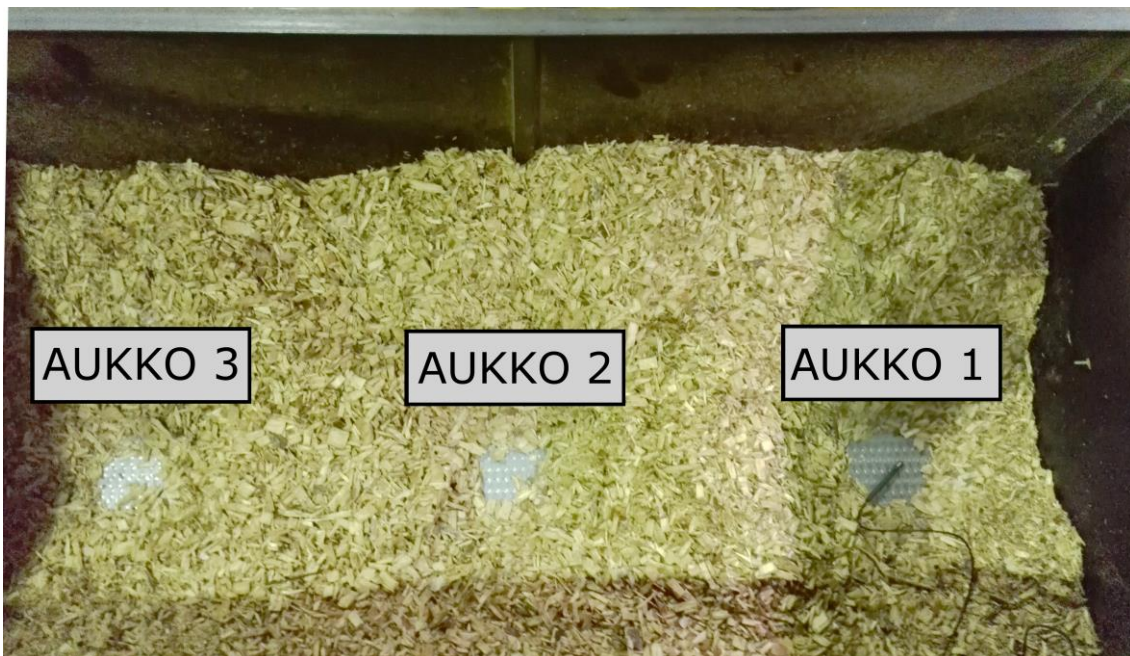
4.2 Irtotiheyden määrittäminen

Hakkeesta otettiin irtotiheysnäytteet ennen kuivausta sekä kuivauksen jälkeen. Mittausastia punnittiin tyhjänä ennen astian täyttämistä ja paino kirjattiin ylös, irtotiheysnäytteet ripoteltiin mittausasti-

aan, näytteen pinta tasattiin samalle tasolle astian kanssa ja täysi astia punnittiin. Irtotiheysmittauksia suoritettiin yhtä kuivausta kohden yhteensä kuusi kappaletta, joista kolme alkukosteudessa olevasta hakkeesta ja loput kolme kuivatusta hakkeesta. Tuloksista laskettiin keskiarvo, joka kirjattiin lopulliseksi tulokseksi.

4.3 Optimointimittaukset

Optimointimittauksia varten hakepatjasta paljastettiin kolmesta kohtaa pohja, joista mitattiin kuivausilman lämpötila ja suhteellinen kosteus eri puhallusilmamäärillä. Hakkeelle ei suoritettu kosteusmittausta optimointimittausten aikana. Kuviosta 10 nähdään aukkojen numerointi.



KUVIO 10 Hakkeesta paljastettiin pohja kolmesta kohtaa, joista mitattiin puhallusilman lämpötila sekä suhteellinen kosteus eri puhallusmäärillä

Mittaustuloksista (taulukko 1) nähdään puhallusilman lämpötila ja suhteellinen kosteus kolmen aukon keskiarvoista. Mittauspäivän keskimääräinen lämpötila oli 8,2 °C ja suhteellinen kosteus 65,4 %. Yksityiskohtaiset mittaustulokset löytyvät mittauspöytäkirjasta liitteessä 12.

TAULUKKO 1 Puhallusilman lämpötila sekä suhteellinen kosteus eri puhallusmäärillä

Taajuus [Hz]	Tilavuusvirta [m ³ /h]	Lämpötila [°C]	Suht. Kost. [%]	Teho [kW]
10	1100	30,4	20,9	8,70
15	1650	26,4	25,3	8,77
20	2200	23,4	29,2	8,76
25	2750	21,3	32,9	8,94
30	3300	19,7	35,7	9,15
35	3850	18,3	39,5	9,47
40	4400	18,0	40,0	9,91
45	4950	17,4	42,3	10,34
50	5500	16,7	44,7	10,86

Optimointimittaustulosten avulla laskettiin optimaalinen kuivausteho eri puhallusilmamäärillä. Kuivaustehon määrittämistä varten laskettiin kuivausilman vedensidontakyky, ilman tiheys, ilman massavirta ja näillä arvoilla laskettiin optimaalinen veden haihtuminen. Lisäksi taulukkoon laskettiin ns. kuivausteho. Seuraavassa luvussa käydään läpi laskut optimointimittauksille 10 Hz:n säädöillä.

4.3.1 Optimointimittauslaskut

Luvun lopussa olevassa taulukossa keskipakoispuhaltimen tilavuusvirta on laskettu valituille taajuuksille kaavalla 2:

KAAVA 2. Keskipakoispuhaltimen tilavuusvirta suhteessa pyörimisnopeuteen.

$$\frac{q_{v1}}{q_{v2}} = \frac{n_1}{n_2}$$

missä

q_{v1} = tilavuusvirta pyörimisnopeudella 1 (m^3/h)

q_{v2} = tilavuusvirta pyörimisnopeudella 2 (m^3/h)

n_1 = pyörimisnopeus 1 (1/s)

n_2 = pyörimisnopeus 2 (1/s)

Laskuissa on käytetty pyörimisnopeuden tilalla taajuusmuuntimella säädettyä taajuutta (Hz).

KAAVA 3. Keskipakoispuhaltimen tilavuusvirran laskukaava.

$$q_{v2} = \frac{n_1}{n_2} * q_{v1}$$

jossa kaavalla 3 laskettuna

ESIMERKKI

$$q_{v2} = \frac{10 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} * 5500 \text{ m}^3/\text{h} = 1100 \text{ m}^3/\text{h}$$

Ilman lämpötila sekä suhteellinen kosteus on saatu mittaustuloksista. Kuivurin teho kyseisillä moottorin taajuuksilla on saatu myös mittaustuloksista. Ilman vedensidontakyky luettiin liitteenä 1 olevasta Mollier-diagrammista. Ilman tiheys eri lämpötiloissa on interpoloitu ilman ominaisuuksien taulukosta. Ilman massavirta laskettiin kaavalla 4:

KAAVA 4. Ilman massavirran laskukaava.

$$q_{mi1} = q_{v1} * \rho$$

missä

q_{mi1} = kuivausilman massavirta (kg/h)

ρ = tiheys (kg/m^3)

ESIMERKKI

$$q_{mi1} = 1100 \text{ m}^3/\text{h} * 1,163 \text{ kg}/\text{m}^3 = 1279,3 \text{ kg}/\text{h}$$

Taulukossa 2 olevan haihtuvan veden massavirta laskettiin kaavalla 5:

KAAVA 5. Haihtuvan veden massavirran laskukaava.

$$q_{mv1} = \frac{q_{mi1}}{1000} * k$$

missä

q_{mv1} = haihtuvan veden massavirta (kg/h)

k = vedensidontakyky (g_{H_2O}/kg_{O_2})

1000 = muunnoskerroin g \rightarrow kg

ESIMERKKI

$$q_{mv1} = \frac{1279,3 \text{ } kg_{O_2}/h}{1000} * 6,0 \text{ } g_{H_2O}/kg_{O_2} = 7,68 \text{ } kg_{H_2O}/h$$

Taulukossa oleva viimeinen sarake kuvastaa haihdutetun veden määrää sähkötehoon nähden. Kyseisestä arvosta käytetään nimitystä kuivausteho. Kuivausteho laskettiin kaavalla 6:

KAAVA 6. Kuivaustehon laskukaava.

$$D_t = \frac{q_{mv1}}{P}$$

missä

D_t = kuivausteho [(kg/h) / kW]

P = kuivurin teho (kW)

ESIMERKKI

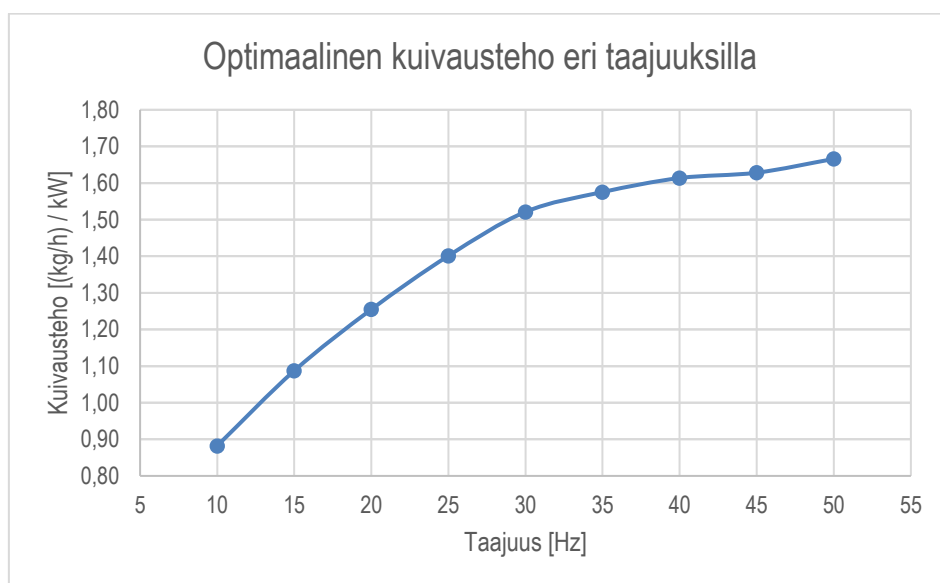
$$D_t = \frac{7,68 \text{ } kg_{H_2O}/h}{8,7 \text{ } kW} = 0,88 \text{ } \frac{kg_{H_2O}/h}{kW}$$

Taulukon 2 tuloksista havaitaan kuivaustehon kasvavan suuremmilla kuivausilmamäärillä, vaikka kuivausilman lämpötila on korkeampi sekä kuivausilman suhteellinen kosteus pienempi.

TAULUKKO 2 Kuivurin optimaalinen kuivausteho eri puhallusilmamäärillä

Taajuus [Hz]	Tilavuusvirta [m ³ /h]	Lämpötila [°C]	Suht. kost. [%]	Veden-sidon-takyky [g/kg]	Tiheys [kg/m ³]	Massavirta [kg/h]	Vettä haihtuu [kg/h]	Teho [kW]	Kuivaus-teho [(kg/h) / kW]
10	1100	30,4	20,9	6,0	1,163	1279,3	7,68	8,70	0,88
15	1650	26,4	25,3	4,9	1,179	1945,4	9,53	8,77	1,09
20	2200	23,4	29,2	4,2	1,190	2618,0	11,00	8,76	1,25
25	2750	21,3	32,9	3,8	1,199	3297,3	12,53	8,94	1,40
30	3300	19,7	35,7	3,5	1,205	3976,5	13,92	9,15	1,52
35	3850	18,3	39,5	3,2	1,211	4662,4	14,92	9,47	1,58
40	4400	18,0	40,0	3,0	1,212	5332,8	16,00	9,91	1,61
45	4950	17,4	42,3	2,8	1,215	6014,3	16,84	10,34	1,63
50	5500	16,7	44,7	2,7	1,218	6699,0	18,09	10,86	1,67

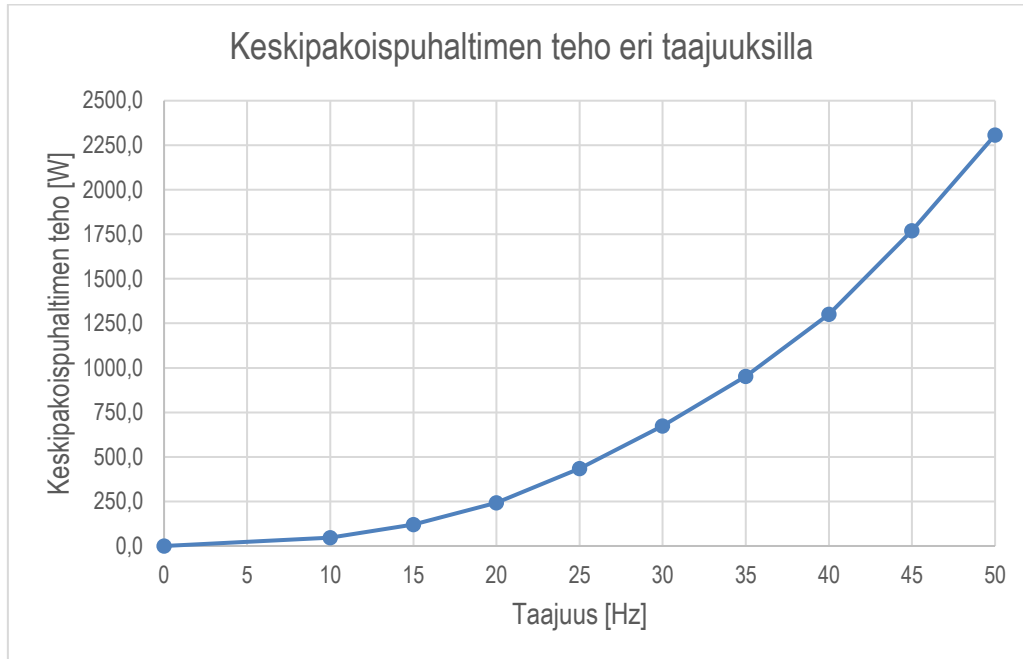
Kuvaajasta (kuvio 11) nähdään kuivaustehon nousevan huomattavasti 10 ja 30 Hz välillä, minkä jälkeen kuivaustehon nousu hidastuu. Ennen optimointimittausten suorittamista kuivattiin yleensä 35 Hz:n taajuudella, mutta optimointimittausten jälkeen alettiin suorittaa kuivausmittauksia 45 Hz:n taajuudella. Teoriassa 50 Hz:n taajuus olisi parempi, mutta meluhaittojen sekä todella pölyisen ilman takia päädyttiin käyttämään 45 Hz:n taajuutta.



KUVIO 11 Optimaalinen kuivausteho eri taajuuksilla

4.3.2 Eri ilmamäärillä lasketut vedensitomiskyvyt

Keskipakoispuhaltimen teho eri taajuuksilla näkyy kuviosta 12. Kuvaajan piirtoon käytetyt mittaus-tulokset löytyvät liitteestä 12.



KUVIO 12 Keskipakoispuhaltimen teho eri taajuuksilla

Laskuissa käytetyt arvot on saatu optimointimittauksista. Laskuissa käytetty ulkoilman lämpötila on 15 °C ja suhteellinen kosteus 60 %. Laskuissa ei ole otettu huomioon häviöitä. Keskipakoispuhaltimen teho on saatu mittauksista.

Keskipakoispuhaltimen ilmamäärä laskettiin kaavalla 3. Kuivausilman tiheys interpoloitiin ilman tiheyksien taulukosta. Kuivausilman massavirta laskettiin kaavalla 4. Puhallettavan ilman lämpötila arvioitiin optimointimittauksien avulla. Optimointimittauksissa 25 Hz:n säädöillä puhallusilman lämpötilan havaittiin nousevan 13 °C, jolloin 25 Hz:n säädöillä 15 °C:n ilman lämpötilalla puhallusilman lämpötila on 28 °C. Samalla tavalla ilman lämpötila arvioitiin 35 Hz:n ja 45 Hz:n säädöille. Ilman suhteellinen kosteus lämmitettynä 28 °C:n lämpötilaan luettiin Mollier-diagrammista.

Puhallusilman vedensitomiskyky 25 Hz:n säädöillä optimointilaskujen mukaan on 16,77 kg/h ja vedensitomiskyky sähkötehoon nähden 3,55 kg/kWh. Vedensitomiskyky 28 °C:n ilman lämpötilalla on noin 5,2 grammaa vettä yhtä ilmakiloa kohden. (Taulukko 3.)

TAULUKKO 3 Optimaalinen vedensitomiskyky 25 Hz:n säädöillä

Keskipakoispuhaltimen kierrosluku	25 Hz
Keskipakoispuhaltimen ilmamäärä	2750 m ³ /h
Keskipakoispuhaltimen teho	435,6 W
Lämmittimen + KPP teho	9,01 kW
Lämmittimen teho	8,57 kW
Lämmöntalteenoton hs.	50 %
Lämmittimen + KPP teho LTO:lla	4,72 kW
Kuivausilman tiheys	1,173 kg/m ³
Kuivausilman massavirta	3225,75 kg/h
Puhallettavan ilman It	28 °C
Puhallettavan ilman RH	25 %
Vedensitomiskyky kuvaajasta	5,2 g/kg
Vedensitomiskyky	16,77 kg/h
	0,281 kWh/kg
	3,55 kg/kWh

Puhallusilman vedensitomiskyky 35 Hz:n säädöillä optimointilaskujen mukaan on 20,44 kg/h ja vedensitomiskyky sähkötehoon nähden 3,90 kg/kWh. Vedensitomiskyky 26 °C:n ilman lämpötilalla on noin 4,5 grammaa vettä yhtä ilmakiloa kohden. Jo pelkällä 700 W tehon nostolla saadaan vedensitomiskykyä kasvatettua noin neljällä kilogrammalla tuntia kohden. (Taulukko 4.)

TAULUKKO 4 Optimaalinen vedensitomiskyky 35 Hz:n säädöillä

Keskipakoispuhaltimen kierrosluku	35 Hz
Keskipakoispuhaltimen ilmamäärä	3850 m ³ /h
Keskipakoispuhaltimen teho	951,6 W
Lämmittimen + KPP teho	9,52 kW
Lämmittimen teho	8,57 kW
Lämmöntalteenoton hs.	50 %
Lämmittimen + KPP teho LTO:lla	5,24 kW
Kuivausilman tiheys	1,18 kg/m ³
Kuivausilman massavirta	4543 kg/h
Puhallettavan ilman It	26 °C
Puhallettavan ilman RH	30 %
Vedensitomiskyky kuvaajasta	4,5 g/kg
Vedensitomiskyky	20,44 kg/h
	0,256 kWh/kg
	3,90 kg/kWh

Puhallusilman vedensitomiskyky 45 Hz:n säädöillä optimointilaskujen mukaan on 24,70 kg/h ja vedensitomiskyky sähkötehoon nähden 4,08 kg/kWh. Vedensitomiskyky 24 °C:n ilman lämpötilalla on noin 4,2 grammaa vettä yhtä ilmakiloa kohden. Taas noin 800 W tehon nostolla saadaan vedensitomiskykyä kasvatettua noin neljällä kilogrammalla tuntia kohden. (Taulukko 5.)

TAULUKKO 5 Optimaalinen vedensitomiskyky 45 Hz:n säädöillä

Keskipakoispuhaltimen kierrosluku	45 Hz
Keskipakoispuhaltimen ilmamäärä	4950 m ³ /h
Keskipakoispuhaltimen teho	1770 W
Lämmittimen + KPP teho	10,34 kW
Lämmittimen teho	8,57 kW
Lämmöntalteenoton hs.	50 %
Lämmittimen + KPP teho LTO:lla	6,06 kW
Kuivausilman tiheys	1,188 kg/m ³
Kuivausilman massavirta	5880,6 kg/h
Puhallettavan ilman It	24 °C
Puhallettavan ilman RH	32 %
Vedensitomiskyky kuvaajasta	4,2 g/kg
Vedensitomiskyky	24,70 kg/h
	0,245 kWh/kg
	4,08 kg/kWh

5 KUIVAUSTULOKSET

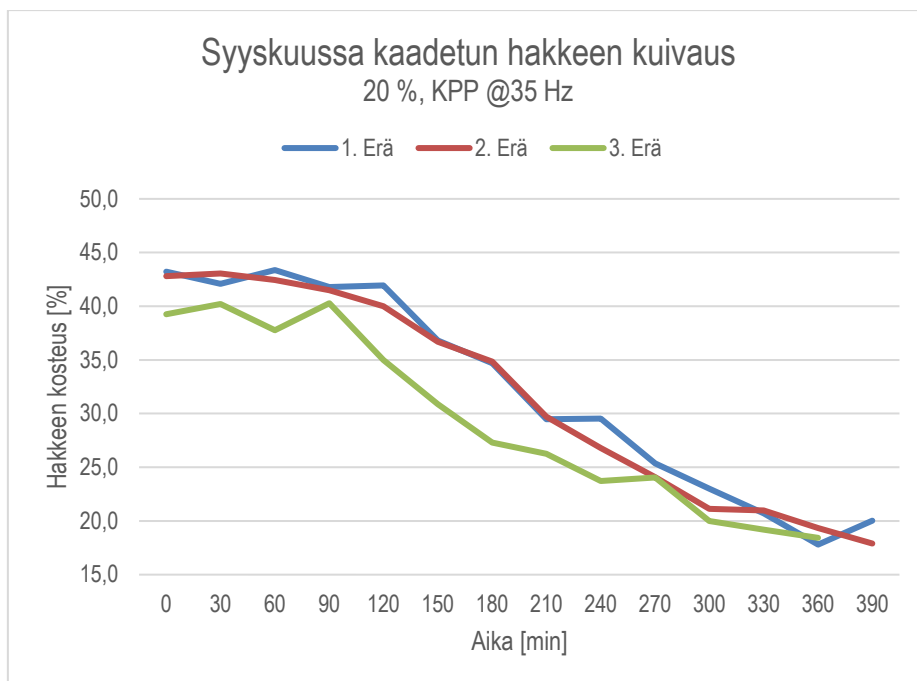
Tässä luvussa käydään läpi kuivaustulokset eri kaatoajankohtina, kuivausajankohtina sekä eri kuivausasetuksilla. Kuvaajien piirtoon käytettiin pikakosteusmittarin antamia kosteusarvoja. Pikakosteusmittarin näyttäessä tavoitekosteutta haketta kuivattiin vielä puoli tuntia tavoitekosteuden saavuttamiseksi.

5.1 Syyskuussa kaadetun hakkeen kuivaukset

Syyskuussa kaadettu ja haketettu koivu kuivattiin lokakuussa Sanginsuun hallissa, jossa ei ollut lämmitystä, joten kuivaustuloksissa on suuria eräkohtaisia vaihteluita. Eräkohtaista vaihtelua tapahtuu pääosin ilman kosteuspitoisuuden sekä lämpötilan vaihteluista eri kuivausajankohtina.

5.1.1 Kuivaukset 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella

Pienemmällä puhallusilman määrällä haketta joutui kuivaamaan noin 90 minuuttia, ennen kuin hakkeen kosteudessa tapahtui huomattavaa muutosta. Syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 20 %:n kosteuteen aikaa kului noin 6,5 tuntia (kuvio 13). Näiden kolmen kuivauksen uunikosteusmittausten alkukosteuksien keskiarvo on 40,2 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 19,7 %, joten haketta kuivattiin 20,5 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 65,3 kWh.



KUVIO 13 Syyskuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 35 Hz:n säädöillä 20 %:n kosteuteen

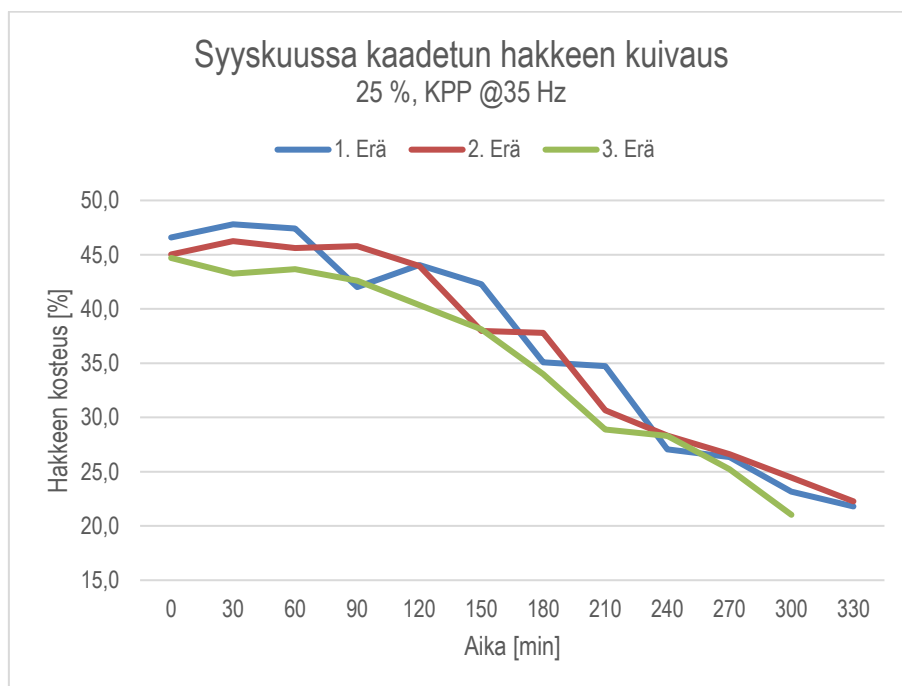
Taulukossa 6 näkyy kuivaushyötysuhteita, joilla voidaan nopeasti vertailla eri asetuksilla kuivattujen hake-erien kuivaustuloksia. Ensimmäisessä sarakkeessa näkyvä arvo (tässä tapauksessa 0,31 %/kWh) kuvaa kuivattua kosteusprosenttia yhtä kilowattituntia energiaa kohden. Tässä sarakkeessa isompi arvo tarkoittaa parempaa kuivaustulosta. Seuraavassa sarakkeessa näkyvä arvo kuvaa kulutettua energiaa kuivattua kosteusprosenttia kohden. Tässä sarakkeessa pienempi arvo tarkoittaa parempaa kuivaustulosta. Viimeisessä sarakkeessa näkyvä arvo kuvaa kuluvaa aikaa yhtä kuivattua kosteusprosenttia kohden. Tässä sarakkeessa pienempi arvo tarkoittaa parempaa kuivaustulosta.

TAULUKKO 6 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä.

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,30	%/kWh	3,37	kWh/%	19,70	min/%
0,33	%/kWh	3,05	kWh/%	17,81	min/%
0,32	%/kWh	3,17	kWh/%	18,37	min/%
0,31	%/kWh	3,20	kWh/%	18,62	min/%

5.1.2 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella

Hakkeen kuivaus 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä kesti noin 5 tuntia. Kuviosta 14 nähdään, että huomattavaa muutosta hakkeen kosteudessa tapahtui vasta 90 minuutin kuivauksen jälkeen. Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 41,7 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 26,0 %, joten haketta kuivattiin 15,7 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 52,0 kWh.



KUVIO 14 Syyskuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 35 Hz:n säädöillä 25 %:n kosteuteen

Kuivurin kuivaushyötysuhde oli 0,30 %/kWh. Kuivattua kosteusprosenttia kohden kului energiaa keskimäärin 3,3 kilowattituntia ja aikaa noin 20 minuuttia. (Taulukko 7.)

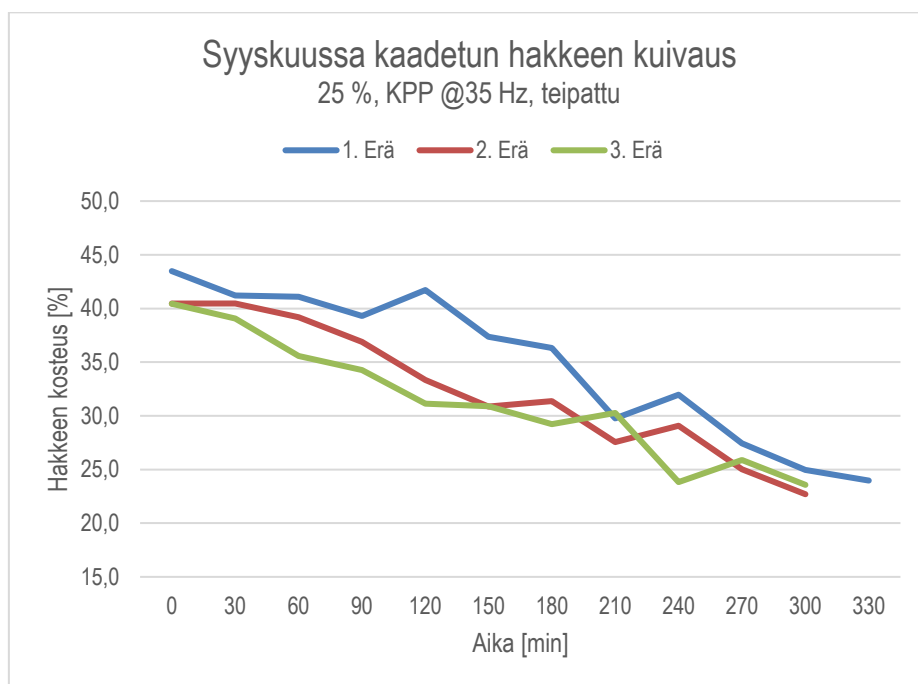
TAULUKKO 7 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä.

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,33	%/kWh	3,05	kWh/%	18,56	min/%
0,30	%/kWh	3,32	kWh/%	19,81	min/%
0,28	%/kWh	3,58	kWh/%	20,83	min/%
0,30	%/kWh	3,32	kWh/%	19,74	min/%

Näiden kuivausten jälkeen huomattiin lämmittimen ja keskipakoispuhaltimen välillä olevan ilma-aukkoja, joista lämmitetyn ilman sekaan tuli lämmittämätöntä ilmaa, joten lämmityksen hyöty katosi. Näin ollen ilma-aukot teipattiin tiiviiksi ja tästä edespäin kaikissa kuivauksissa ilma-aukot on peitetty ilmastointiteipillä. Termillä ”teippaus” tarkoitetaan siis ilma-aukkojen peittämistä ilmastointiteipillä.

5.1.3 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna

Syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivaus 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna kesti noin 5 tuntia. Kuvioista 15 nähdään, että huomattavaa muutosta hakkeen kuivauksessa tapahtui jo 30 minuutin kuivauksen jälkeen. Ensimmäisen erän kuivauksessa 120 minuutin kohdalla näkyvä huomattava piikki kosteudessa johtunee mittarin aiheuttamasta virheestä sekä hakkeen epätasaisesta laadusta. Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 40,9 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 27,9 %, joten haketta kuivattiin 13,0 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 51,3 kWh.



KUVIO 15 Syyskuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 35 Hz:n säädöillä teipattuna 25 %:n kosteuteen

Taulukosta 8 nähdään kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna. Kuivurin kuivaushyötysuhde oli noin 0,25

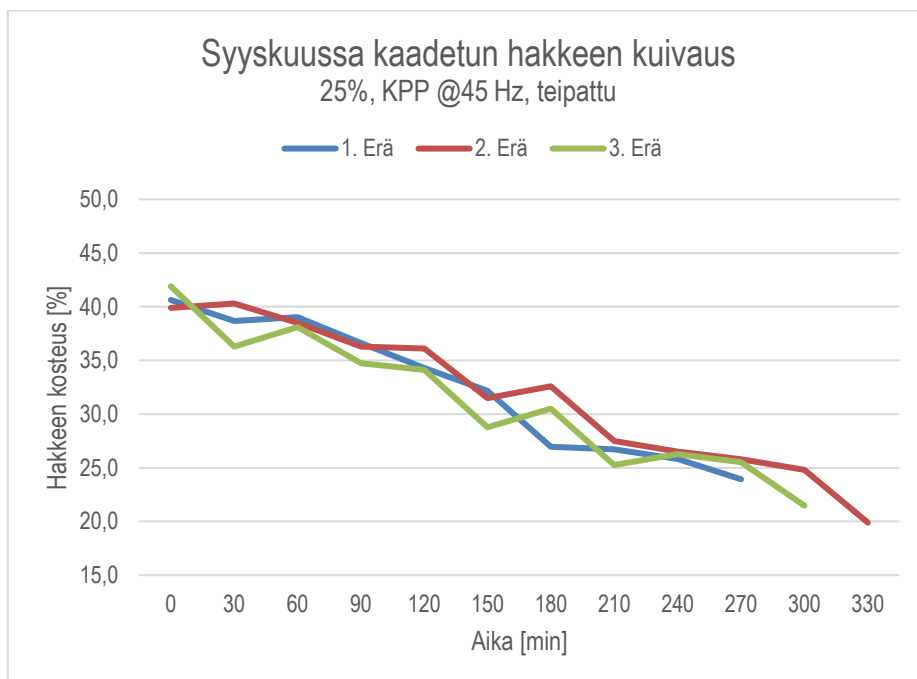
%/kWh ja hake-erän kosteuspitoisuuden aleneminen prosenttiyksiköllä vaati noin 4 kWh ja 24 minuuttia.

TAULUKKO 8 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 % kosteuteen 35 Hz säädöillä teipattuna.

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,25	%/kWh	3,94	kWh/%	24,09	min/%
0,21	%/kWh	4,87	kWh/%	28,85	min/%
0,30	%/kWh	3,29	kWh/%	20,00	min/%
0,25	%/kWh	4,03	kWh/%	24,3	min/%

5.1.4 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n taajuudella teipattuna

Kun haketta kuivattiin 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n taajuudella, aikaa kului noin 6 tuntia (kuvio 16). Muutosta kosteudessa huomattiin 60 minuutin kuivauksen jälkeen ja kuivauksen huomattiin olevan ennalta-arvattavampi, eikä kosteuksissa tapahtunut yllättäviä muutoksia. Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 40,8 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 27,5 %, joten haketta kuivattiin 13,3 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 50,9 kWh.



KUVIO 16 Syyskuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 45 Hz:n säädöillä teipattuna 25 %:n kosteuteen

Taulukossa 9 nähdään kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n säädöillä teipattuna. Keskimäärin hake-erän kuivaushyötysuhde oli noin 0,26 %/kWh, energiaa kului 3,9 kilowattituntia ja aikaa noin 23 minuuttia kuivattua kosteusprosenttia kohden.

TAULUKKO 9 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n säädöillä teipattuna.

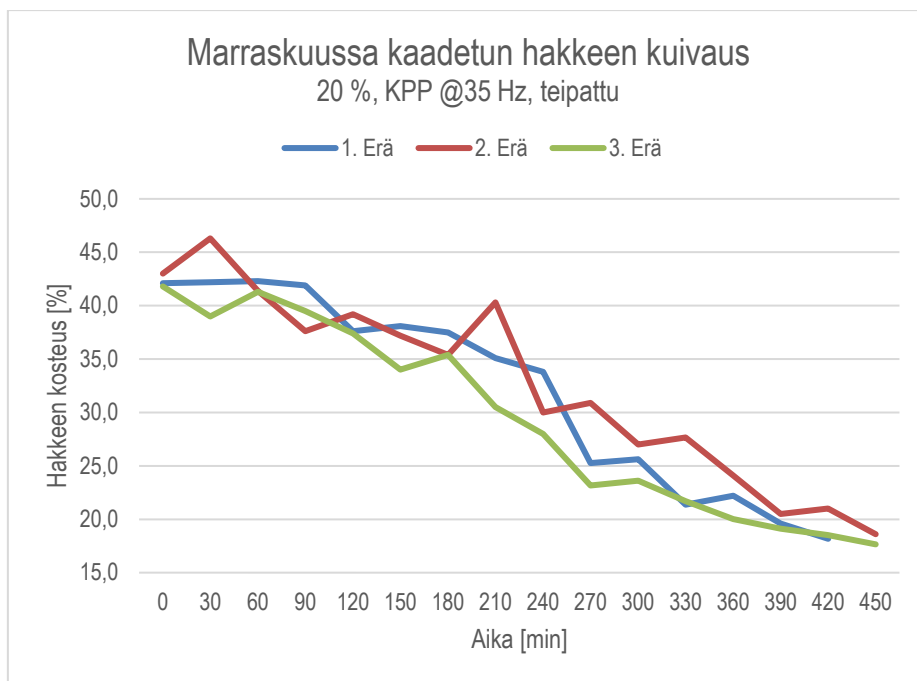
Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,23	%/kWh	4,28	kWh/%	23,89	min/%
0,25	%/kWh	4,04	kWh/%	26,23	min/%
0,30	%/kWh	3,37	kWh/%	18,47	min/%
0,26	%/kWh	3,90	kWh/%	22,9	min/%

5.2 Marraskuussa kaadetun hakkeen kuivaukset

Marraskuussa kaadetut hakkeet kuivattiin joulukuussa Utajärven Mustikkakankaalla olevassa lämmitetyssä hallissa, joten kuivausolosuhteet pysyivät suurin piirtein samanlaisina lopuissa kuivauksissa.

5.2.1 Kuivaukset 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna

Marraskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivaus 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella kesti noin 7,5 tuntia. Huomattavaa muutosta hakkeen kosteudessa havaittiin 60 minuutin kuivauksen jälkeen (kuvio 17). Toisen erän kuivauksessa näkyvät piikit johtuvat mittalaitteen virheestä sekä hakkeen epätasaisesta laadusta. Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 41,9 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 18,5 %, joten haketta kuivattiin 23,4 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 65,2 kWh.



KUVIO 17 Marraskuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 35 Hz:n säädöillä teipattuna 20 %:n kosteuteen

Hake-erät kuivuivat keskimäärin 19 minuutissa prosenttiyksikön verran. Parhaiten kuivui erä kolme, jossa kesti noin 17 minuuttia prosenttiyksikön kuivaamiseen. Keskimäärin yhden prosenttiyksikön kuivaamiseen kului noin 2,8 kilowattituntia energiaa (taulukko 10).

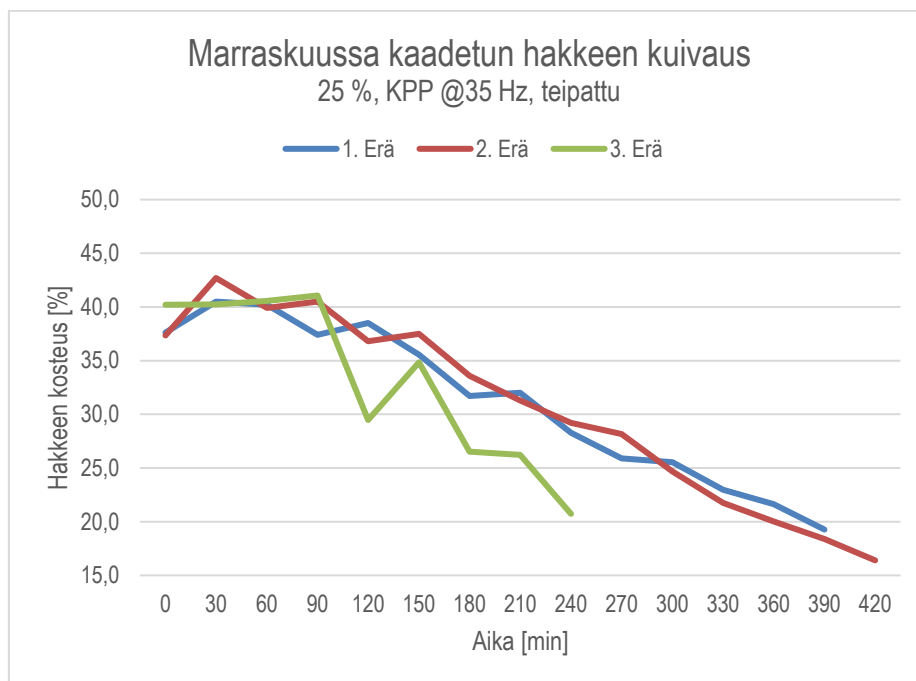
TAULUKKO 10 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna.

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,34	%/kWh	2,91	kWh/%	19,53	min/%
0,34	%/kWh	2,94	kWh/%	20,64	min/%
0,39	%/kWh	2,56	kWh/%	16,90	min/%
0,36	%/kWh	2,81	kWh/%	19,0	min/%

5.2.2 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna

Marraskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivaus 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä kesti noin 6,5 tuntia. Huomattavaa muutosta hakkeen kosteudessa huomattiin vasta 90 minuutin kuivauksen jälkeen (kuvio 18). Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 45,6 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 23,6 %, joten haketta kuivattiin 22,0 prosenttiyksikköä. Kuviosta 18

nähdään selvästi, kuinka suuria eroja kuivauksissa voi olla. Tuloksia vertailtaessa tämän kuivauksen keskiarvoihin ei kannata kiinnittää liikaa huomiota kolmannen erän nopeasta kuivumisesta johtuen. Kolmannen erän kuivauksen kuivaushyötysuhteen arvot nostavat huomattavasti kuivaushyötysuhteiden keskiarvoa, jolloin kuivausasetusten muutoksien hyötyä on vaikeampi nähdä. Tietenkin todellisuudessa hakkeenkuivauksessa vastaavanlaisia kuivauksia tapahtuu johtuen hakkeen epätasaisesta laadusta, hake-erien vaihtelevasta irtotiheydestä sekä ilman lämpötilasta ja kosteudesta. Kuivauksessa energiaa kului noin 52,1 kWh.



KUVIO 18 Marraskuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 35 Hz:n säädöillä teipattuna 25 %:n kosteuteen

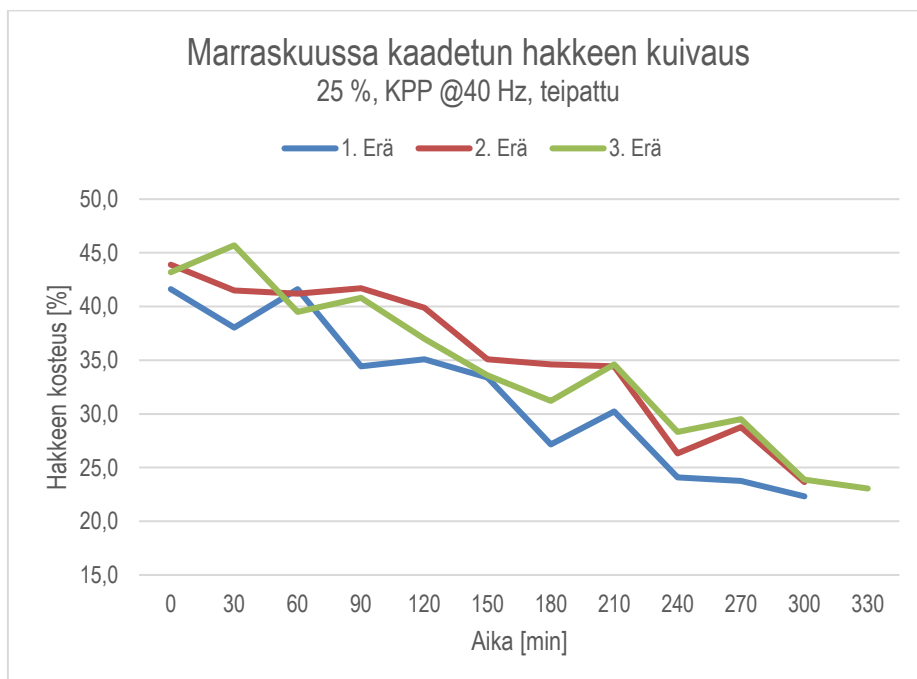
Taulukossa 11 nähdään kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna. Kuivaushyötysuhde vaihteli 0,38–0,50 %/kWh. Keskimäärin hake-erän kuivaamiseen prosenttiyksiköllä kului 2,35 kWh ja noin 16 minuuttia. Taulukosta huomataan, kuinka suuri vaikutus kolmannen erän kuivauksella on keskiarvoihin.

TAULUKKO 11 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna.

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,38	%/kWh	2,63	kWh/%	18,06	min/%
0,41	%/kWh	2,41	kWh/%	16,67	min/%
0,50	%/kWh	2,02	kWh/%	12,44	min/%
0,43	%/kWh	2,35	kWh/%	15,7	min/%

5.2.3 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 40 Hz:n taajuudella teipattuna

Marraskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivaus 25 %:n kosteuteen 40 Hz:n säädöillä kesti noin 5 tuntia (kuvio 19). Huomattavaa muutosta hakkeen kosteudessa havaittiin 60 minuutin kuivauksen jälkeen. Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 43,4 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 23,4 %, joten haketta kuivattiin 20,0 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 48,9 kWh.



KUVIO 19 Marraskuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 40 Hz:n säädöillä teipattuna 25 %:n kosteuteen

Yhden prosenttiyksikön kuivumiseen tarvittiin noin 2,5 kWh ja aikaa kului lähes 16 minuuttia. Hakeerien kuivaushyötysuhde oli noin 0,41 %/kWh (taulukko 12).

TAULUKKO 12 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 40 Hz:n säädöillä teipattuna

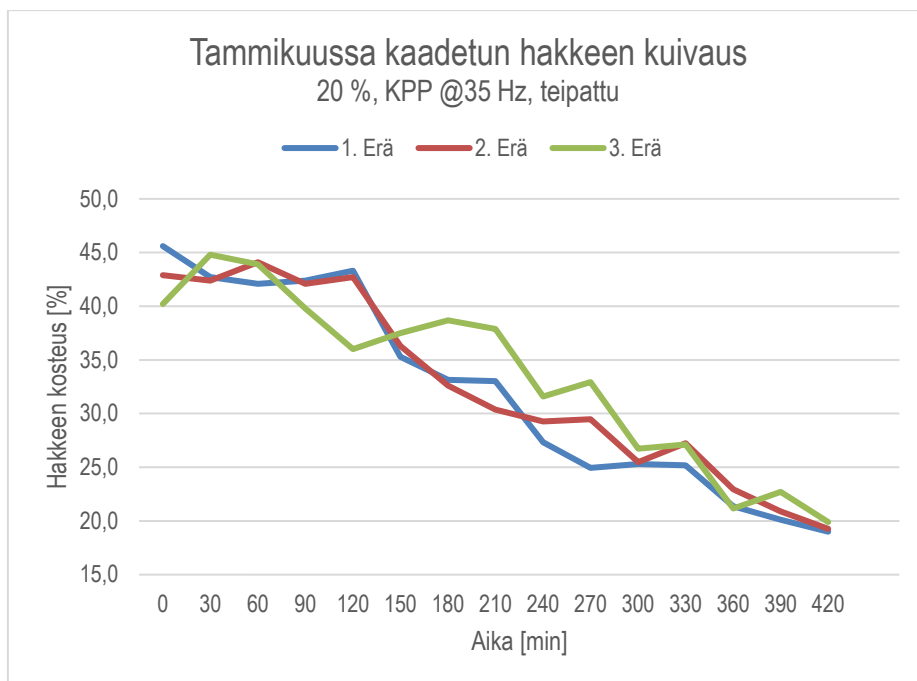
Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,46	%/kWh	2,18	kWh/%	13,10	min/%
0,40	%/kWh	2,50	kWh/%	16,22	min/%
0,37	%/kWh	2,72	kWh/%	17,74	min/%
0,41	%/kWh	2,46	kWh/%	15,7	min/%

5.3 Tammikuussa kaadetun hakkeen kuivaukset

Tammikuussa kaadettu ja haketettu koivu kuivattiin helmikuussa Utajärvellä.

5.3.1 Kuivaukset 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna

Tammikuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivaus 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä kesti noin 7 tuntia. Huomattavaa muutosta hakkeen kosteudessa havaittiin vasta 120 minuutin kuivauksen jälkeen (kuvio 20). Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 42,8 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 22,3 %, joten haketta kuivattiin 20,5 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 64,0 kWh.



KUVIO 20 Tammikuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 35 Hz:n säädöillä teipattuna 20 %:n kosteuteen

Taulukossa 13 nähdään kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna. Keskimäärin hake-erän kuivaamiseen yhdellä prosenttiyksiköllä energiaa kului noin 3,1 kWh ja aikaa meni noin 21 minuuttia.

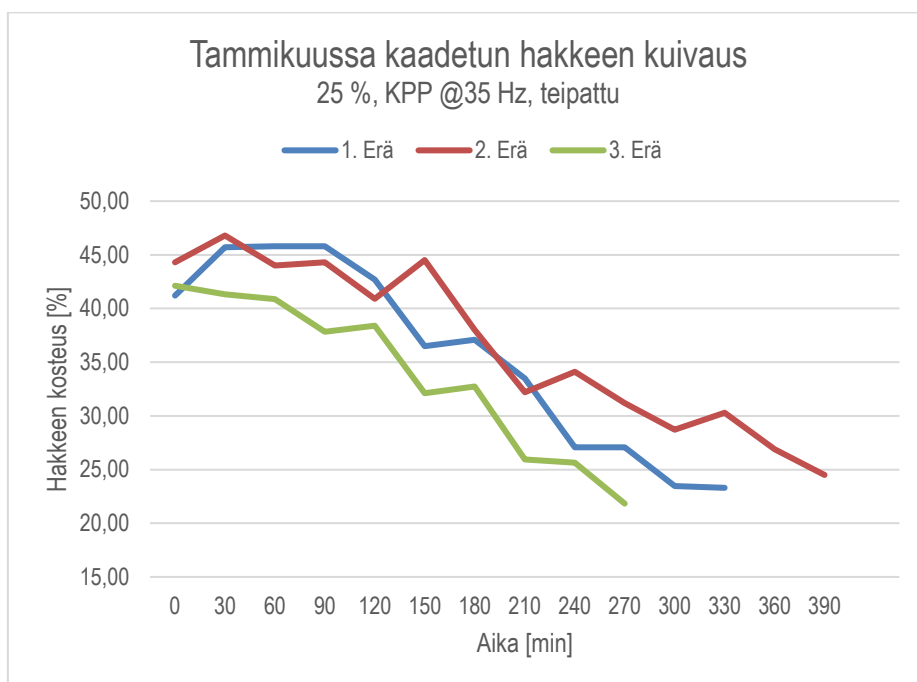
TAULUKKO 13 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 20 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,34	%/kWh	2,91	kWh/%	19,18	min/%
0,34	%/kWh	2,96	kWh/%	19,53	min/%
0,28	%/kWh	3,56	kWh/%	23,24	min/%
0,32	%/kWh	3,14	kWh/%	20,7	min/%

5.3.2 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n taajuudella teipattuna

Tammikuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivaus 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä kesti noin 5,5 tuntia. Huomattavaa muutosta hakkeen kosteudessa havaittiin vasta 120 minuutin kuivauksen jälkeen (kuvio 21). Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 44,2 % ja

loppukosteuksien keskiarvo on 27,5 %, joten haketta kuivattiin 16,7 prosenttiyksikköä. Kuivauksessa energiaa kului noin 49,8 kWh.



KUVIO 21 Tammikuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 35 Hz:n säädöillä teipattuna 25 %:n kosteuteen

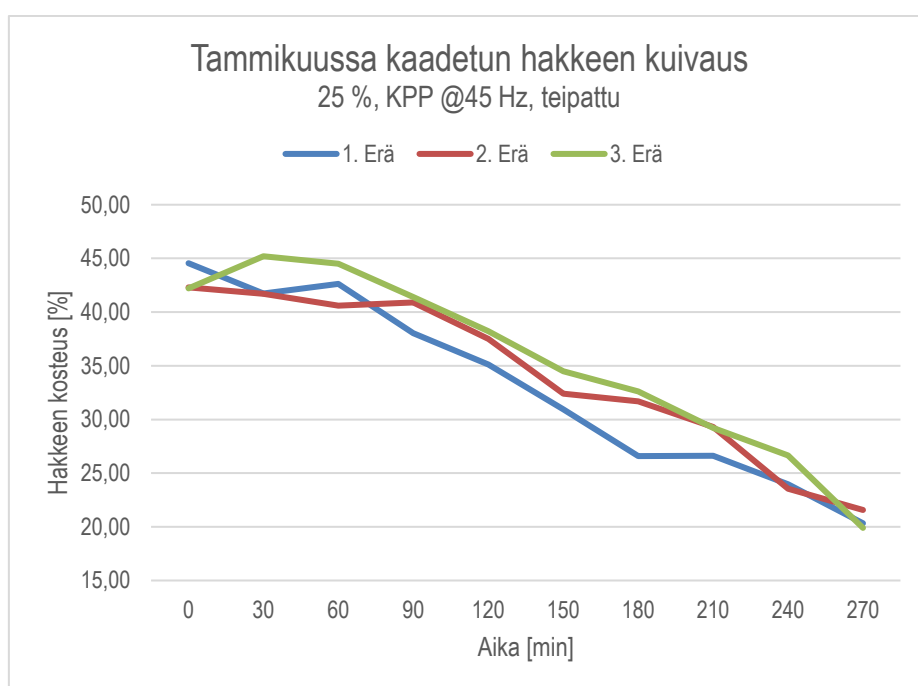
Kuivurin kuivaushyötysuhde oli 0,34 %/kWh. Keskimääräinen energiankulutus yhtä kuivattua kosteusprosenttia kohden oli noin 3 kWh, ja aikaa kului noin 20 minuuttia (taulukko 14).

TAULUKKO 14 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 35 Hz:n säädöillä teipattuna.

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,32	%/kWh	3,08	kWh/%	19,88	min/%
0,30	%/kWh	3,31	kWh/%	23,49	min/%
0,39	%/kWh	2,55	kWh/%	15,98	min/%
0,34	%/kWh	2,98	kWh/%	19,8	min/%

5.3.3 Kuivaukset 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n taajuudella teipattuna

Tammikuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivaus 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n säädöillä kesti noin 4,5 tuntia. Huomattavaa muutosta hakkeen kosteudessa havaittiin 60 minuutin kuivauksen jälkeen (kuvio 22). Näiden kolmen kuivauksen alkukosteuksien keskiarvo on 44,6 % ja loppukosteuksien keskiarvo on 23,3 %, joten haketta kuivattiin 21,3 prosenttiyksikköä. Kuvaajasta nähdään, että kuivaus suuremmalla ilmamäärällä on ennalta-arvattavampi kuin kuivaus pienemmällä ilmamäärällä, ja näin ollen kuivauksessa on helpompi saavuttaa tavoitekosteus. Kuivauksessa energiaa kului noin 45,7 kWh.



KUVIO 22 Tammikuussa kaadetun hakkeen kuivauskäyrä 45 Hz:n säädöillä teipattuna 25 %:n kosteuteen

Taulukossa 15 nähdään kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n säädöillä teipattuna. Keskimäärin energiaa kului 2,1 kWh ja aikaa noin 13 minuuttia kuivattua kosteusprosenttia kohden. Arvoista huomataan kuivaushyötysuhteen olevan huomattavasti parempi kuin pienemmällä ilmamäärällä kuivatuissa hakkeissa. Lisäksi aikaa kului huomattavasti vähemmän suuremmalla ilmamäärällä kuivattua kosteusprosenttia kohden.

TAULUKKO 15 Kuivaushyötysuhteet syyskuussa kaadetun ja haketetun koivun kuivauksessa 25 %:n kosteuteen 45 Hz:n säädöillä teipattuna.

Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee kuivurin kuivaushyötysuhteen					
0,45	%/kWh	2,22	kWh/%	12,65	min/%
0,52	%/kWh	1,93	kWh/%	12,33	min/%
0,44	%/kWh	2,30	kWh/%	14,43	min/%
0,47	%/kWh	2,15	kWh/%	13,1	min/%

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia hakkeeseen puhallettavan kuivausilmamäärän vaikutusta hakkeen kuivaukseen. Työssä suoritettiin kuivausmittauksia eri ajankohtina kaadetuille koivuhakkeille vaihtelevilla kuivausilmamäärillä.

Kuvaajista huomataan nopeasti, kuinka suuria eroja hake-erien kuivauksissa voi olla, varsinkin kun kuivataan 35 Hz:n säädöillä. Myös 40 Hz:n säädöillä kuivauksissa näkyy vaihtelua, mutta 45 Hz:n säädöillä kuivaukset olivat huomattavasti suoraviivaisempia muihin kuivauksiin verrattuna. Myös kuivaushyötysuhteita vertailtaessa huomataan 40 ja 45 Hz:n säädöillä kuivaushyötysuhteiden sekä kuluvan ajan kuivattua prosenttia kohden olevan parempia. Kuivaukset yleisestikin korkeammilla ilmamäärillä olivat sujuvampia johtuen hakkeen kosteuden tasaisesta muutoksesta ja kuivauksen keston paremmasta ennustettavuudesta.

Kuivattaessa hakkeita 35 Hz:n säädöillä kuivauksen alku oli hidas mutta noin 30 %:n kosteuden jälkeen kuivaus tuntui kiihtyvän toisin kuin korkeammilla säädöillä, joissa alku oli nopea mutta lopussa noin 30 %:n kosteuden jälkeen kuivaus tuntui hidastuvan hieman. Ehkä kuivauksissa muutuvilla säädöillä voisi olla oma hyötynsä, esimerkiksi kuivaus noin 30 %:n kosteuteen 45 Hz:n säädöillä, ja kun kosteus saavutettu, ilmamäärän muutos pienempään, esimerkiksi 35 Hz:iin tai mahdollisesti jopa pienempäänkin. Tällöin kuivausilman lämpötila nousee ja näin myös kuivausilman suhteellinen kosteus laskee, jolloin kuivausilman vedensitomiskyky paranee. Muutetulla ilmamäärällä kuivaus 30 %:n kosteudesta loppukosteuteen.

Tutkimustuloksia 45 Hz:n kuivauksista on vähän, joten tarkkaa hyötyä kuivauksista on vaikea kertoa. Näiden tulosten perusteella kuivauksissa kuitenkin havaittiin olevan jonkin verran hyötyä kuivausilman massavirran kasvattamisesta. Mielestäni aihetta kannattaisi tutkia enemmän, kenties jopa eri kuivausmateriaaleilla ja suuremmissa mittasuhteissa. Energiatehokkaampaa kuitenkin on nostaa kuivausilman massavirtaa, ennemmin kuin yrittää lämmittää yleisesti eristeenä käytettyä ilmaa.

LÄHTEET

- Hilli, A., Kylmänen, E., Härkönen, M. & Uutela, T. 2016. Hake pelletin korvaajana keskuslämmityskattilassa. ePooki. Oulun ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystyön julkaisut 32. Viitattu 19.9.2017, <http://urn.fi/urn:nbn:fi-fe2016121431395>.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Espoo: VTT.
- Bio-Expert Oy. 2012. Bioenergiasta tietoa. Viitattu 18.03.2017, <http://lammitysjarjestelmat.com/bioenergiasta-tietoa/>.
- Bioenergia ry. 2017. Tietoa bioenergiasta ja turpeesta. Viitattu 17.03.2017, <http://www.bioenergia.fi/Bioenergiatietoa>.
- Bioenergianeuvoja.fi. 2017. Laatu. Viitattu 19.03.2017, <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/hake/laatu/>.
- European Biomass Association. 2015. Biomass Basic Facts. Viitattu 17.03.2017, <http://www.aebiom.org/about-bioenergy/basic-facts/>.
- Farmcomp Oy. 2008. Wile BIO Moisture-hakemittari. Viitattu 18.3.2017, <http://www.farmcomp.fi/wile/tuotteet/wile-puulle/wile-bio-moisture>.
- International Energy Agency. 2017. Bioenergy and Biofuels. Viitattu 17.03.2017, <https://www.iea.org/topics/renewables/subtopics/bioenergy/>.
- Kauppinen, V. 2014. Puupolttoaineen kuivuriopas. Vammala: Vammalan kirjapaino Oy.
- Lepistö, T. 2010. Laatuhakkeen tuotanto-opas. 2. Sastamala: Vammalan kirjapaino. Viitattu 20.3.2017, https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/laatuhakkeen_tuotanto-opas_2.painos.pdf
- Luonnonvarakeskus. 2017. Puun energiakäyttö. Viitattu 20.3.2017, <http://stat.luke.fi/puun-energiakaytto>.
- Metsäntutkimuslaitos. 2010. Ilmastovaikutukset ja hiilensidonta. Viitattu 17.3.2017, <http://www.metla.fi/metinfo/northernpine/ilmastovaikutukset-ja-hiilensidonta.html>.
- Metsäntutkimuslaitos. 2014. Puun energiakäyttö. Viitattu 18.03.2017, <http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/laatu/puupolttoaine.htm>.
- REN21. 2011. Renewables 2011 Global Status Report.
- Shaw Renewables. 2017. Closed Carbon Cycle. Viitattu 17.3.2017, <http://shawrenewables.co.uk/>.
- Ventur. 2014. Centrifugal fans. Viitattu 18.3.2017, <http://www.ventur.eu/>.

LIITTEET

Liite 1 Mollier-diagrammi

Liite 2 Mittauspöytäkirja

Liite 3 Mittauspöytäkirja

Liite 4 Mittauspöytäkirja

Liite 5 Mittauspöytäkirja

Liite 6 Mittauspöytäkirja

Liite 7 Mittauspöytäkirja

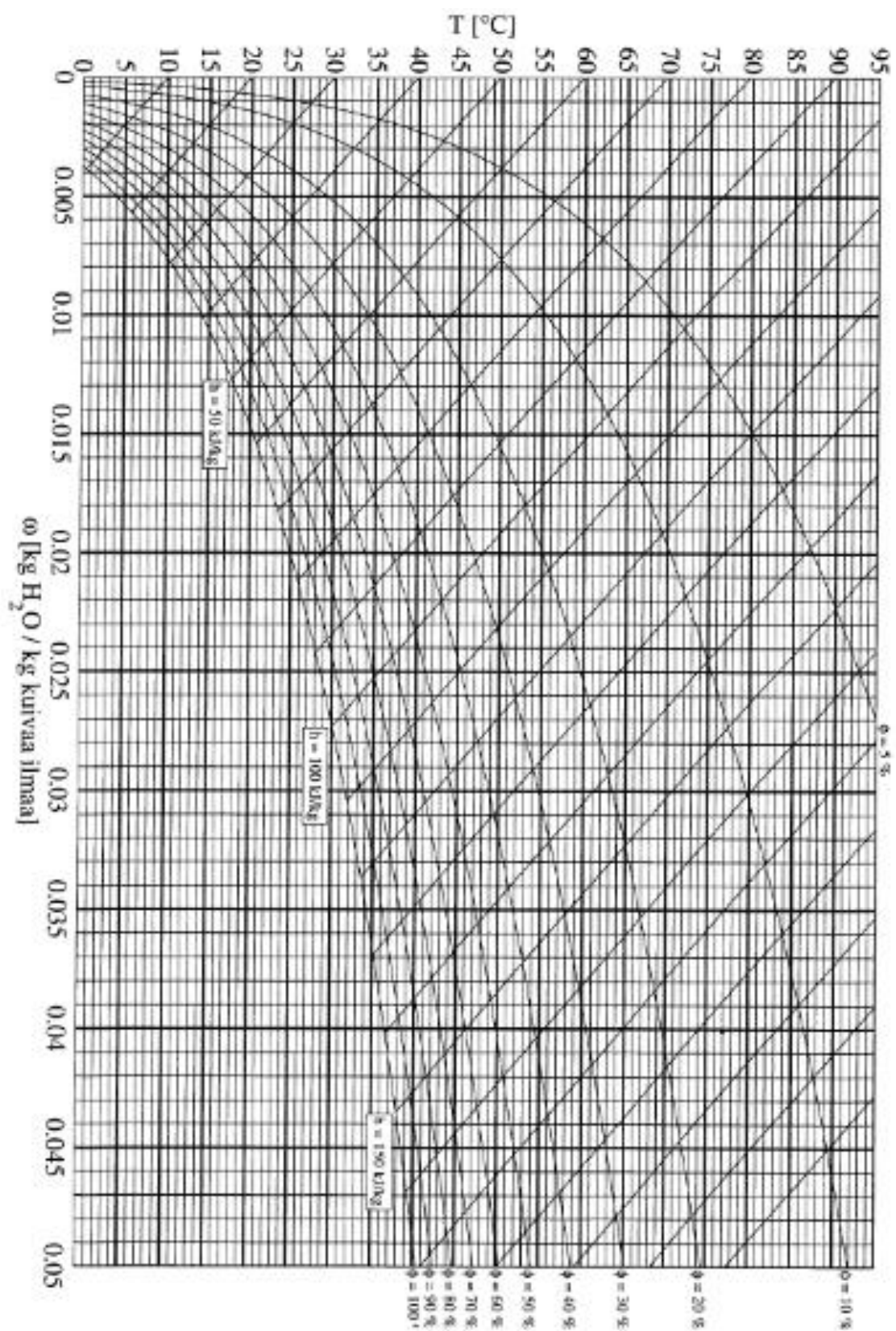
Liite 8 Mittauspöytäkirja

Liite 9 Mittauspöytäkirja

Liite 10 Mittauspöytäkirja

Liite 11 Mittauspöytäkirja

Liite 12 Mittauspöytäkirja



[illegible]

Hakkeen kuivaus kun keskipakopuhaltimen taajuus säädetty @35 Hz														Syysskuussa kaadettu!	
Tavoitekosteus: 25 %															
	Kosteus pikamittarilla			Unnikosteus			Irtoiheys		Ilma		Mittaus				
	Alku %	Loppu %	Kuivunut	Alku %	Loppu %	Kuivunut	Alku kg/m³	Loppu kg/m³	Kosteus %	Lämpötila °C	Kesto min	Kulutus kWh	Teho kW		
1. Erä	47,8	21,8	26,0	42,4	25,7	16,7	318,5	234,7	79,6	5,8	310,0	50,9	9,9		
	45,0	22,3	22,7	42,1	26,0	16,1	299,1	237,8	81,4	6,9	319,0	53,5	10,1		
	44,7	21,0	23,7	40,7	26,3	14,4	287,0	244,4	91,9	6,5	300,0	51,5	10,3		
2. Erä															
3. Erä															
Keskiaarvo	45,8	21,7	24,1	41,7	26,0	15,7	301,5	238,9	84,3	6,4	309,7	52,0	10,1		
Aika	1. Erä	2. Erä	3. Erä	Keskiaarvo	Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee ns. "kuivaushyötysuhteen"										
0	46,6	45,0	44,7	45,4											
30	47,8	46,3	43,3	45,8	0,33 %/kwh	3,05 kwh/%	18,56 min/%								
60	47,4	45,6	43,7	45,6	0,30 %/kwh	3,32 kwh/%	19,81 min/%								
90	42,0	45,8	42,6	43,5	0,28 %/kwh	3,58 kwh/%	20,83 min/%								
120	44,1	44,0	40,4	42,8	0,30 %/kwh	3,32 kwh/%	19,74 min/%								
150	42,3	38,0	38,1	39,5											
180	35,1	37,8	34,0	35,6											
210	34,7	30,7	28,9	31,4											
240	27,1	28,3	28,3	27,9											
270	26,4	26,6	25,2	26,1											
300	23,2	24,5	21,0	22,9											
330	21,8	22,3		22,0											

[illegible]

Hakkeen kuivaus kun keskipakoispuhaltimen taajuus säädetty @45 Hz														Syyskuussa kaadettu!
ja ilma-aukot peitetty teipillä. Tavoitekosteus: 25 %														
	Kosteus pikamittarilla			Uunikosteus			Irtotiheys			Ilma		Mittaus		
	Alku %	Loppu %	Kuivunut	Alku %	Loppu %	Kuivunut	Alku kg/m³	Loppu kg/m³	Kosteus %	Lämpötila °C	Kesto min	Kulutus kWh	Teho kW	
1. Erä	40,6	23,9	16,7	40,0	28,7	11,3	280,7	239,6	90,4	0,0	270,0	48,4	10,8	
	39,9	19,9	20,0	40,8	28,6	12,2	283,1	249,2	93,4	1,5	320,0	49,3	9,2	
	41,9	21,5	20,4	41,6	25,3	16,3	292,1	232,9	95,1	1,6	301,0	55,0	11,0	
2. Erä														
3. Erä														
Keskiarvo	40,8	21,8	19,0	40,8	27,5	13,3	285,3	240,6	93,0	1,0	297,0	50,9	10,3	
Aika	1. Erä	2. Erä	3. Erä	Keskiarvo										
0	40,6	39,9	41,9	40,8										
30	38,7	40,3	36,3	38,4										
60	39,0	38,5	38,1	38,6										
90	36,6	36,3	34,7	35,9										
120	34,3	36,1	34,1	34,8										
150	32,2	31,5	28,8	30,8										
180	27,0	32,6	30,5	30,0										
210	26,7	27,5	25,3	26,5										
240	25,8	26,5	26,3	26,2										
270	23,9	25,8	25,5	25,1										
300		24,8	21,5	23,1										
330		19,9		19,9										

Hakkeen kuivaus kun keskipakaispuhaltimen taajuus säädetty @35 Hz														Marraskuussa kaade ttu!
ja ilma-aukot peitetty teipillä. Tavoitekosteus: 20 %														
Kosteus pikamittarilla				Uunikosteus			Irtoiheys		Ilma		Mittaus			
1. Erä 2. Erä 3. Erä Keskiarvo	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kosteus	lämpötila	Kesto	Kulutus	Teho	
	%	%		%	%		kg/m³	kg/m³	%	°C	min	kWh	kW	
	42,1	18,2	23,9	43,3	21,8	21,5	272,1	228,1	72,4	5,4	420,0	62,6	8,9	
	43,0	18,6	24,4	41,1	19,3	21,8	309,5	224,7	70,4	8,4	450,0	64,2	8,6	
	41,8	17,7	24,2	41,3	14,5	26,8	272,1	207,2	48,2	3,7	453,0	68,7	9,1	
Keskiarvo	42,3	18,1	24,2	41,9	18,5	23,4	284,5	220,0	63,6	5,8	441,0	65,2	8,9	
Aika	1. Erä	2. Erä	3. Erä	Keskiarvo	Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee ns. "kuivaushyötysuhteen"									
0	42,1	43,0	41,8	42,3	0,34	%/kwh	2,91	kwh/%	19,53	min/%				
30	42,2	46,3	39,0	42,5	0,34	%/kwh	2,94	kwh/%	20,64	min/%				
60	42,3	41,4	41,3	41,7	0,39	%/kwh	2,56	kwh/%	16,90	min/%				
90	41,9	37,6	39,5	39,7	0,36	%/kwh	2,81	kwh/%	19,0	min/%				
120	37,6	39,2	37,4	38,1										
150	38,1	37,2	34,0	36,4										
180	37,5	35,4	35,4	36,1										
210	35,1	40,3	30,5	35,3										
240	33,8	30,0	28,0	30,6										
270	25,3	30,9	23,2	26,4										
300	25,6	27,0	23,6	25,4										
330	21,4	27,7	21,7	23,6										
360	22,2	24,1	20,0	22,1										
390	19,6	20,5	19,1	19,7										
420	18,2	21,0	18,5	19,2										
450		18,6	17,7	18,1										

Hakkeen kuivaus kun keskipakoispuhaltimen taajuus säädetty @35 Hz
ja ilma-aukot peitetty teipillä. Tavoitekosteus: 25 %

Marraskuussa kaadettui

	Kosteus pikamittarilla			Uunikosteus			Irtotiheys		Ilma		Mittaus		
	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kosteus	Lämpötila	Kesto	Kulutus	Teho
	%	%		%	%		kg/m ³	kg/m ³	%	°C	min	kWh	kW
1. Erä	37,6	19,3	18,3	45,9	24,3	21,6	293,1	221,2	65,7	7,2	390,0	56,7	8,7
2. Erä	37,4	16,4	21,0	44,9	19,7	25,2	300,5	213,6	63,1	9,3	420,0	60,8	8,7
3. Erä	40,2	20,7	19,5	46,0	26,7	19,3	279,6	223,0	64,6	8,0	240,0	38,9	9,7
Keskiarvo	38,4	18,8	19,6	45,6	23,6	22,0	291,0	219,3	64,4	8,2	350,0	52,1	9,0

Aika	1. Erä	2. Erä	3. Erä	Keskiarvo	Huomi! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee ns. "kuivaushyötysuhteen"			
0	37,6	37,4	40,2	38,4	0,38 %/kwh	2,63 kwh/%	18,06 min/%	
30	40,5	42,7	40,3	41,2	0,41 %/kwh	2,41 kwh/%	16,67 min/%	
60	40,2	39,9	40,6	40,2	0,50 %/kwh	2,02 kwh/%	12,44 min/%	
90	37,4	40,5	41,1	39,7	0,43 %/kwh	2,35 kwh/%	15,7 min/%	
120	38,5	36,8	29,5	34,9				
150	35,6	37,5	34,8	36,0				
180	31,7	33,6	26,5	30,6				
210	32,0	31,3	26,2	29,8				
240	28,3	29,2	20,7	26,1				
270	25,9	28,2		27,0				
300	25,5	24,7		25,1				
330	23,0	21,8		22,4				
360	21,6	20,0		20,8				
390	19,3	18,4		18,8				
420		16,4		16,4				

Hakkeen kuivaus kun keskipakaispuhaltimen taajuus säädetty @40 Hz
ja ilma-aukot peitetty teipillä. Tavoitekosteus: 25 %

Marraskuussa kaadettu!

	Kosteus pikamittarilla			Uunikosteus			Irtotiheys		Ilma		Mittaus		
	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kosteus	lämpötila	Kesto	Kulutus	Teho
	%	%		%	%		kg/m ³	kg/m ³	%	°C	min	kWh	kW
1. Erä	41,6	22,3	19,3	45,3	22,4	22,9	294,0	226,5	61,2	4,1	300,0	49,9	10,0
2. Erä	43,9	23,7	20,3	42,6	24,1	18,5	279,5	236,3	57,5	6,0	300,0	46,2	9,2
3. Erä	43,2	23,1	20,2	42,2	23,6	18,6	284,3	223,5	64,1	7,7	330,0	50,5	9,2
Keskiarvo	42,9	23,0	19,9	43,4	23,4	20,0	285,9	228,8	60,9	6,0	310,0	48,9	9,5

Alka	1. Erä	2. Erä	3. Erä	Keskiarvo	Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee ns. "kuivaushyötysuhteen"				
0	41,6	43,9	43,2	42,9	0,46 %/kWh	2,18 kWh/%	13,10 min/%		
30	38,1	41,5	45,7	41,8					
60	41,6	41,2	39,5	40,8	0,40 %/kWh	2,50 kWh/%	16,22 min/%		
90	34,4	41,7	40,8	39,0	0,37 %/kWh	2,72 kWh/%	17,74 min/%		
120	35,1	39,9	37,0	37,3					
150	33,4	35,1	33,6	34,0	0,41 %/kWh	2,46 kWh/%	15,7 min/%		
180	27,2	34,6	31,2	31,0					
210	30,2	34,4	34,6	33,1					
240	24,1	26,3	28,3	26,2					
270	23,8	28,8	29,5	27,3					
300	22,3	23,7	23,9	23,3					
330			23,1	23,1					

Hakkeen kuivaus kun keskipakoispuhaltimen taajuuus säädetty @35 Hz ja ilma-aukot peitetty teipillä. Tavoitekosteus: 20 %

Tammikuussa kaadettu!

	Kosteus pikamittarilla			Uunikosteus			Irtotiheys		Ilma		Mittaus		
	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku kg/m ³	Loppu kg/m ³	Kosteus %	lämpötila °C	Kesto min	Kulutus kWh	Teho kW
	%	%		%	%								
1. Erä	45,6	19,0	26,6	42,9	21,0	21,9	308,9	-	52,1	3,5	420,0	63,6	9,1
2. Erä	42,9	19,3	23,6	43,5	22,0	21,5	324,1	235,7	51,4	3,0	420,0	63,6	9,1
3. Erä	40,2	19,9	20,3	42,0	23,8	18,2	320,5	240,7	59,1	3,7	423,0	64,8	9,2
Keskiarvo	42,9	19,4	23,5	42,8	22,3	20,5	317,8	238,2	54,2	3,4	421,0	64,0	9,1

Aika	1. Erä	2. Erä	3. Erä	Keskiarvo	Huom! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee ns. "kuivaushyötysuhteen"			
					0,34 %/kwh	2,91 kwh/%	19,18 min/%	
0	45,6	42,9	40,2	42,9				
30	42,7	42,4	44,8	43,3	0,34 %/kwh	2,96 kwh/%	19,53 min/%	
60	42,1	44,1	43,9	43,4	0,28 %/kwh	3,56 kwh/%	23,24 min/%	
90	42,4	42,1	39,8	41,4				
120	43,3	42,7	36,0	40,7	0,32 %/kwh	3,14 kwh/%	20,7 min/%	
150	35,3	36,3	37,5	36,4				
180	33,13	32,6	38,7	34,8				
210	33,03	30,37	37,87	33,8				
240	27,33	29,28	31,6	29,4				
270	24,95	29,47	32,93	29,1				
300	25,3	25,47	26,72	25,8				
330	25,18	27,25	27,12	26,5				
360	21,37	22,95	21,17	21,8				
390	20,13	20,9	22,7	21,2				
420	19	19,27	19,9	19,4				

Tammikuussa kaadettu!

Kosteus pikamittarilla				Uunikosteus			Irtotiheys		Ilma		Mittaus		
1. Erä 2. Erä 3. Erä Keskiarvo	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kuivunut	Alku	Loppu	Kosteus	lämpötila	Kesto	Kulutus	Teho
	%	%		%	%		kg/m ³	kg/m ³	%	°C	min	kWh	kW
	41,2	23,3	17,9	44,5	27,9	16,6	295,7	224,5	56,7	6,5	330,0	51,2	9,3
	44,3	24,5	19,8	44,2	27,6	16,6	300,3	253,0	62,2	7,3	390,0	55,0	8,5
	42,1	21,8	20,3	43,9	27,0	16,9	291,5	233,7	53,8	6,3	270,0	43,1	9,6
Keskiarvo	42,5	23,2	19,3	44,2	27,5	16,7	295,8	237,1	57,5	6,7	330,0	49,8	9,1
Aika	1. Erä	2. Erä	3. Erä	Keskiarvo	Huomi! Nämä arvot kuivurikohtaisia, arvoista näkee ns. "kuivaushyötysuhteen"								
0	41,20	44,30	42,12	42,5									
30	45,7	46,8	41,3	44,6									
60	45,8	44,0	40,9	43,6									
90	45,8	44,3	37,8	42,6									
120	42,7	40,9	38,4	40,7	0,32 %/kwh3,08 kwh/%19,88 min/% 0,30 %/kwh3,31 kwh/%23,49 min/% 0,39 %/kwh2,55 kwh/%15,98 min/% 0,34 %/kwh2,98 kwh/%19,8 min/%								
150	36,5	44,5	32,1	37,7									
180	37,1	38	32,73	35,9									
210	33,47	32,2	25,93	30,5									
240	27,08	34,1	25,65	28,9									
270	27,08	31,2	21,83	26,7									
300	23,47	28,7		26,1									
330	23,3	30,3		26,8									
360		26,9		26,9									
390		24,5		24,5									

Hakkeen kuivaus kun keskipakoispuhaltimen taajuus säädetty @45 Hz ja ilma-aukot peitetty teipillä. Tavoitekestaus: 25 %

Tammikuussa kaadettu!

[illegible]

		Ilman It		Suht. Kost.		Kulutus		kWh		kW		Aika
Taajuus	It ennen	It jälkeen	It aukossa 1	It aukossa 2	It aukossa 3	Ennen	Jälkeen	jälkeen-Ennen	Teho			
0			Lian korkea lämpötila mittalaitteille				3397,4	3397,6	0,3	8,571	1,75	
10	12,4	73,5	28,5	22,2	30,8	20,5	31,9	19,9	3395,9	3397,4	1,4	10
15	10,5	50,2	26,3	24,4	26,6	25,3	26,2	26,3	3394,5	3395,9	1,5	10
20	10,2	44,4	22,8	29,4	23,6	28,8	23,7	29,3	3393,0	3394,5	1,5	10
25	10,3	40,3	21,3	32,1	21,3	32,6	21,2	34	3391,5	3393,0	1,5	10
30	10,2	36,7	19,3	36,5	19,9	34,6	19,9	35,9	3390,0	3391,5	1,5	10
35	10,4	35,8	18,7	38,1	18,5	37,8	17,7	42,5	3388,4	3390,0	1,6	10
40	10,6	33,9	18,2	38,6	18,1	39,8	17,8	41,7	3386,8	3388,4	1,7	10
45	10,5	30	17,6	40,4	17,5	41,9	17,1	44,6	3385,0	3386,8	1,7	10
50	10,1	28,3	16,3	46,2	17	42,2	16,9	45,6	3383,2	3385,0	1,8	10
						Taajuus [Hz]		KPP teho [W]				
						keskus		0 W				
						KPP		10 46,8 W				
								15 121,2 W				
								20 242,4 W				
						lämmitin		25 435,6 W				
								30 673,2 W				
								35 951,6 W				
								40 1300,8 W				
								45 1770 W				
								50 2307,6 W				

AUKKO 3

AUKKO 2

AUKKO 1